

GRANDES VOÛTES

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME V

3[me] PARTIE — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE COMMUN A TOUTES LES VOÛTES

LIVRE I. — COMMENT ON PROJETTE UN PONT EN MAÇONNERIE
LIVRE II. — COMMENT ON EXÉCUTE UN PONT EN MAÇONNERIE
LIVRE III. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

BOURGES
IMPRIMERIE V[ve] TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15

—

1914

3e PARTIE

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE

DE COMMUN A TOUTES LES VOÛTES

LIVRE I

COMMENT ON PROJETTE
UN PONT EN MAÇONNERIE

LIVRE II

COMMENT ON EXÉCUTE
UN PONT EN MAÇONNERIE

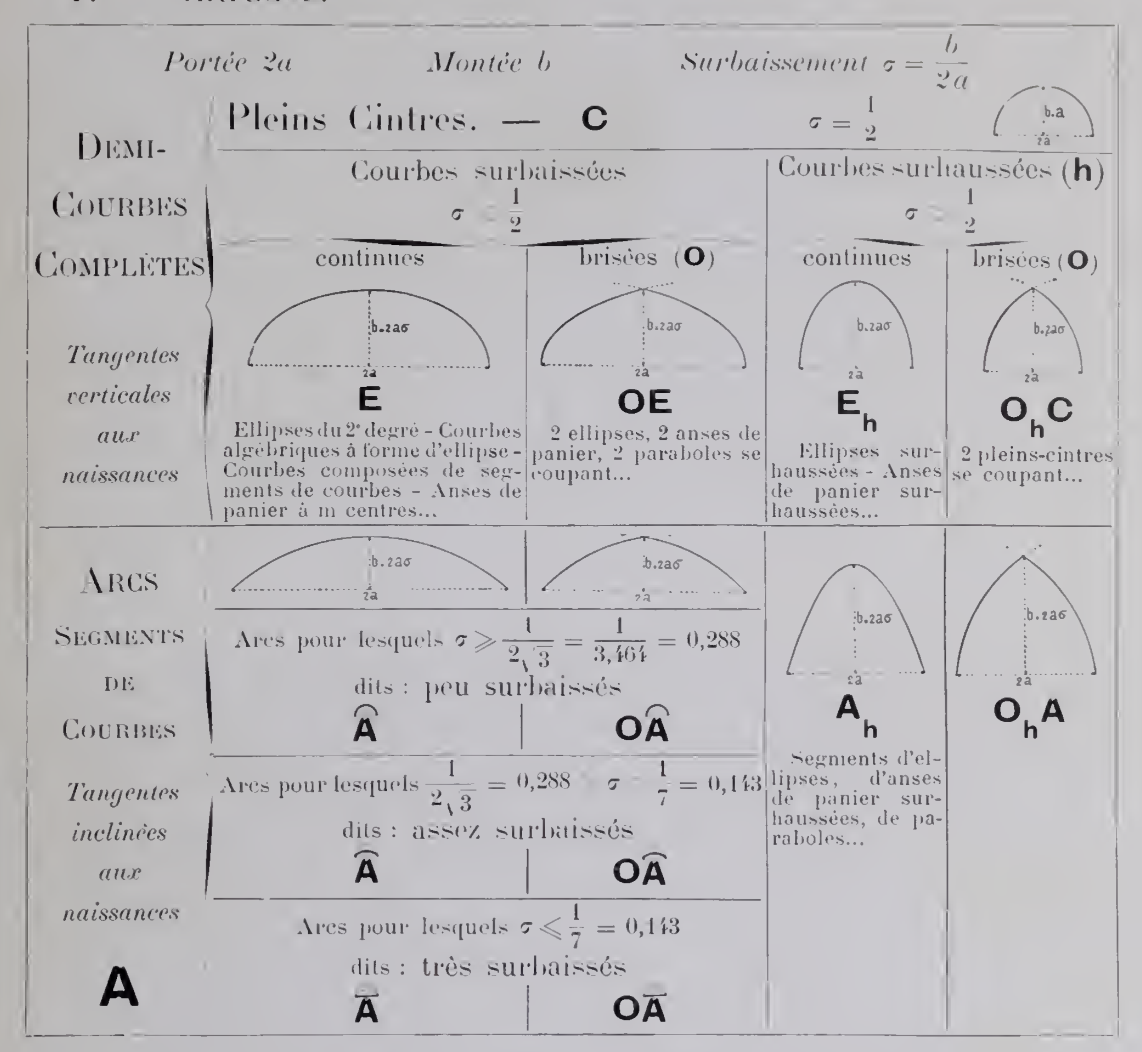
LIVRE III

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

PRÉLIMINAIRES[1]

SYMBOLES

1. — Intrados.



2. Ponts à une seule grande arche et ponts à plusieurs grandes arches. — On a distingué les ponts à une seule grande arche : C^1, E^1, $\overset{\frown}{A}{}^1$, $\widehat{A}{}^1$, $\overline{A}{}^1$... et les ponts à plusieurs : C^n, E^n, $\overset{\frown}{A}{}^n$, $\widehat{A}{}^n$, $\overline{A}{}^n$,....

3. Voie portée.

Ponts-route : C r^{te}, E r^{te}, A r^{te},....
Ponts sous chemin de fer à voie normale : C F^r, E F^r, A F^r,....
Ponts sous chemin de fer à voie étroite : C f^r, E f^r, A f^r,....
Ponts-aqueducs : C aq, E aq,....

4. Ponts en deux anneaux. — Les voûtes sont désignées comme précédemment, mais en doublant la lettre de l'intrados, par exemple : $\widehat{A}{}^1\,\widehat{A}{}^1$ r^{te}....

1. — Résumé des *préliminaires* en tête des Tomes I, II, III.

LIVRE I

COMMENT ON PROJETTE

UN PONT EN MAÇONNERIE

MATÉRIAUX — APPAREIL — DISPOSITION

ASPECT — DÉCORATION

TITRE I

GRANDES VOÛTES EN PIERRE

MATÉRIAUX — APPAREIL — TRAVAIL

CHAPITRE I

DÉSIGNATION DES PRINCIPAUX MATÉRIAUX [1]

LEUR DISTRIBUTION USUELLE DANS LES OUVRAGES [2]

Désignation [1]	Dimensions usuelles (f_1) — En parement — Hauteur ou Épaisseur h	En parement — Largeur l	Queue q	Retour d'équerre — Lits r_1	Retour d'équerre — Joints r_2	Abréviations	Distribution usuelle
Béton.	»			»		B	Voir plus loin, Titre II.
Moellons ordinaires — employés en blocage sans préparation spéciale.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$ Poids $< 40^k$					MO	Gros œuvre; remplissages; massifs de fondation; corps des culées; noyaux des piles, tympans; murs en aile et en retour; parements cachés; parements vus, quand l'aspect n'importe pas.
Moellons ordinaires — choisis, (c'est-à-dire avec sujétion.) — employés en parement. — à joints incertains. « *opus incertum* ».	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$		$\geqslant 0^m20$	$\geqslant 0^m10$	$\geqslant 0^m10$	MOI	Parements vus des tympans, piles, culées, pieds-droits, murs en aile et en retour, radiers, murs de soutènement *(MOI ou MOH suivant la carrière)*.
Moellons ordinaires — choisis — employés en parement. — par assises horizontales grossières.	$\geqslant 0^m10$		$\geqslant 0^m20$	$\geqslant 0^m15$	$\geqslant 0^m10$	MOH	
Moellons ordinaires — choisis — employés en voûte. — méplats, « lités »; lits normaux à l'intrados; assises prolongeant des assises de douelle.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$			aussi pleins que possible	0^m10	MOV	Queutage des voûtes derrière la douelle.
Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan f_1 — Moellons équarris [3]	$\geqslant 0^m15$ $\leqslant 0^m25$	1.5 h à 2.5 h	$\geqslant 0^m30$	0^m20	0^m15	ME	Parements vus des tympans, piles et culées *(sauf les angles)* dans les grands ouvrages. Fût des parapets.
Moellons à face rectangulaire — Moellons équarris — taillés en voussoirs	Fixée par le dessin $\geqslant 0^m15$ $\leqslant 0^m25$	1.5 h à 2.5 h	$\geqslant 0^m30$	Pleins	0^m20	MEV	Douelle des voûtes. Queutage des grandes voûtes.
Moellons à face rectangulaire — Moellons d'appareil [4]	» Dimensions indiquées aux dessins.			Pleins.		MA	Angles des piles et culées des grands ouvrages. Couronnement des parapets.
Moellons à face rectangulaire — Moellons d'appareil — taillés en voussoirs	Dimensions indiquées aux dessins.			Pleins.		MAV	Bandeaux des voûtes.
Libages. — Pierre de taille de grand appareil grossièrement équarrie.	Dimensions indiquées aux dessins.			Pleins.		L	Socles des piles, soubassements.
Pierre de taille [5]. — Blocs appareillés sur les six faces. Toutes les dimensions imposées.	Dimensions indiquées aux dessins.			Pleins.		PT	Bandeaux et archivoltes des grandes voûtes. Crossettes d'appui des piles des voûtes d'évidement. Plinthes, sous-plinthes, corbeaux des refuges, balustres, parapets ajourés, dés à leurs abouts. Couronnement et chaperon des piles.
Briques.				Pleins.		Br	Voûtes, tympans, parapets.

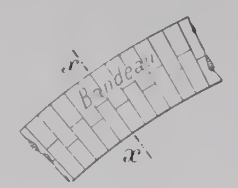
1. — C'est, complétée, la nomenclature donnée dans l'Avertissement, en tête des Tomes I, II, III, IV.

2. — Pour les ouvrages courants et pour les viaducs, elle est détaillée à l'Appendice.

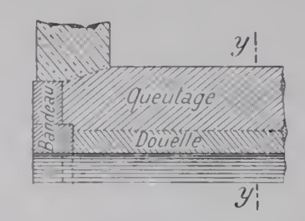
3. — Synonyme : Moellons tétués. 4. — Synonyme : Moellons smillés. 5. — Pierre de taille de petit appareil. Synonyme, moellons piqués.

COMMENT SONT FAITES LES VOÛTES APPAREILLÉES DE 40M ET PLUS [6, 7]

f_2 — Élévation



f_3 — Coupe sur *xx* de f_2



f_4 — Coupe sur *yy* de f_3



§ 1. — *VOÛTES ⩾ 40m A MORTIER DE CHAUX*

Pont	Intrados Voie portée [8]	Monographie, Tome, page	Date	Portée	Surbaissement	Composition de la voûte — Appareil [9] — Bandeaux	Douelle	Queutage	Pierre — Nature	Pierre — Résistance en Kg 0m01²	Chaux — Nature Provenance	Pour 1mc de sable — Poids en Kg	Pour 1mc de sable — Volume en litres	Pressions, Kg 0m01… — Clef — MAX.	Clef — moy.	Reins — MAX.	Reins — moy.
de Lavaur (Vieux Pont)	E1 rte	I-97	1773-91	48m73	1/2.5	PT			Grès mollasse tendre		ch. grasse						
de Gignac	E1 rte	I-103	1776-1810	48.42	1/2.98	PT			»		»						
Mosca	A1 rte	III-199	1834	45	1/8.18	PT			Granit		ch. grasse de Palazzolo						
de Collonges	C1 rte	I-31	1869-73	40	»	PT		Reins en MOV	»		Virieu						
du Saulnier (écroulé en 1912)	A1 rte	III-40	1882	43	1/5	MAV		MEV	Grès calc.	300k	Teil				14k6		14k…
de Pouch	A1 Fr	III-110	1890	47.85	1/3.68	PT		MEV	Granit	»	Teil	350k					
de Fium' Alto	E1 rte	I-110	1862-63	40	1/3.82	L	MOV	MOV		Queutage [10] 150k	Teil	377k					
de Pont-y-tu-Pridd	A1 rte	III-26	1749-50	42.67	1/4	PT	MOV	MOH	Bandeaux Grès dur, Douelle Schiste								
de Chester	A1 rte	III-29	1833-34	60.96	1/4.76	PT	»	»	Bandeaux Marbre, Dlle et Queut. Grès		du pays		500l				
sur la Gravona	A1 fr	II-183	1884	43.53	1/2.59	PT	PT	»	Granit	600k	Teil	333k		26k6		31k8	
des Bains-de-Lucques [11]	A1 rte	III-32	1845-47, 1874-77	47.84	1/6.71	PT	Br	Br		Grès 490 à 625k, Br. 130 à 150k	ch. maigre en pâte		666l		16k3		11k
de Calcio	A1 Fr	III-100	1877-78	42	1/3.53	Br	Br	Br	Briques pressées	335k	ch. hydr. de Palazzolo	450k		12k		23k	
sur la Diveria	A1 Fr	III-130	1901-02	40	1/4	Br	Br	Br	Briques pressées	450k	ch. hydr. de Palazzolo	400k					
du Diable	E1 rte	I-116	1871-72	55	1/4.06	Br	Br	Br	Briques pressées	89k6	ch. grasse, ch. du Teil [12]		333l	15k8	10k6	10k6	7k

§ 2. — *VOÛTES ⩾ 40m A MORTIER BÂTARD (CHAUX ET CIMENT)*

Pont	Intrados Voie portée	Monographie, Tome, page	Date	Portée	Surbaissement	Bandeaux	Douelle	Queutage	Pierre — Nature	Pierre — Résistance	Chaux — Nature Provenance	Poids	Volume	Clef MAX.	Clef moy.	Reins MAX.	Reins moy.
de Nydeck	A1 rte	II-51	1840-44	45.90	1/2.51	PT	PT	MEV	Bandeaux et Douelle: Granit; Queutage: Grès	Bandeaux et Douelle: 500k; Queutage: 211k	Chaux et Ciment :		ch. 400l, cim. 400l				
de Wäldlitobel	A1 Fr	II-157	1883-84	41	1/3.10	M	O	V					500l		12k2		
d'Oloron	C1 Fr	I-45	1881-82	40	»	PT	MEV	MOV				ch. 333k, cim. 111k			11k3		12k
Annibal	E1 rte	I-112	1868-70	55	1/3.92	Br				52k5		[12]	333				

6. — On a classé les voûtes d'après l'appareil du queutage, et pour le même appareil, par dosage décroissant du liant.
7. — 21 ponts à voûtes ⩾ 40m n'ont pu, faute de renseignements, être inscrits aux tableaux § 1, 2, 3.
8. — Pour le sens des symboles, voir Préliminaires, p. 3.
9. — Pour le sens des abréviations, voir Chapitre I.
10. — Bandeaux et douelle : Calcaire à [illegible]k, mortier de ciment.
11. — Au-dessous de 33, corps en calcaire.
12. — Sable . pouzzolane.

Les voûtes articulées sont en italiques.

Pont	Intrados Voie portée [13]	Monographie Tome, page	Date	Portée		Surbaissement	Composition de la voûte										Pressions kg/0.01²			
							Appareil [11]			Pierre			Ciment			Épaisseur des joints, en mm	Clef		Reins	
				entre appuis	aux retombées ou entre rotules		Bandeaux	Douelle	Queutage	Nature	Provenance	Résistance en kg 0.01²	Nature Provenance	Pour 1me de sable: Poids en Kg	Volume en lit.		MAXIMA	moyenne	MAXIMA	moyenne
				m	m															
Teinach	$\overline{A}^1$ r^{te}	III-203	1882	46	33	1/10				Grès		300k	Portland	1000k [15]			29k3		27k5	
...nélius	$\overline{A}^n$ r^{te}	IV-180	1902-03	44	41	1/12				Calcaire (Muschelkalk)	»	»					36		35	
...rimilien		IV-192	1903-05	45.87	44	1/8.98					Franconie	500 à 800k	Portland Dyckerhoff et fils	700k		25	36	32k	36	24k
Prince-Régent	$\overline{A}^1$ r^{te}	IV-239	1900-01	62.40	63	1/9.69											41.7	»	43	»
...-Joseph		IV-242	1901-02	64	60	1/10											»	»	45	»
Signac (cerveau sur 22°)	E^1 Fr	I-131	1871-72	40		1/3.25				»	»	»	Boulogne	666k [16]				16.3		
Höfen	$\overline{A}^1$ r^{te}	IV-41	1885	41	28	1/10				Grès		917 à 1036k	Portland de Blaubeuren		666l		29 [17]		24 [17]	
Morbegno	$\overline{A}^1$ Fr	IV-65	1902-03	70	»	1/7				Granit		1100k	»	600k			69.4		70.1	
Seythenex	$\widehat{A}^n$ r^{te}	III-177	1908-11	41.19	»	1/4.10				»	Seythenex	1400 à 1600k	Vicat n° 1				23		23	
Salcano	$\widehat{A}^1$ Fr	III-141	1904-06	85	»	1/3.90		PT		Calcaire	Nabresina	1200k	Portland 1er choix de Spalato	[18]	[19]	16	28		51	
...l'Empereur-François	E^n r^{te}	I-168	1898-1901	42.34		1/4.95				Granit	»						40.7		32.8	
...le Schalchgraben	$\widehat{A}^1$ Fr	II-168	1904-05	52		1/3.46							Portland		333l		19.8		27.9	
...la Steyrling		137	1904-05	70		1/4.45							Portland				Pr. maxima : 37k			
Langenbrand		152	1907-09	59		1/4										20	30.5		41.1	
...la Gutach		122	1899-1900	64		1/3.97				Grès [21]	Saverne	400 à 600k	Portland Schifferdecker		[20]		»	»	»	»
...le Schwändeholzdobel	$\widehat{A}^1$ Fr	III 126	1899-1900	57		1/4					»	»								»
Jaremcze		114	1893-94	65		1/3.63						480 à 1180k	Portland de Szczakowa (Galicie)		285l	18 au moins	Pr. maxima			27.5
Jamna		118	1893-94	48		1/4						»								25.1
Worochta		120	1893-94	40		1/4						»								21.4
...le Strandeelven		132	1902-04	41		1/3.64				Gneiss		1000 à 2700k		1/3 [22]		25	20		35	
Svenkerud		150	1905-07	44		1/6.66				Grès		900 à 1500k		1/2,5 [23]			30.3		25.8	
Boïlefos		159	1908-..	40		1/4				Gneiss		1100 à 2100k					20		30.8	
Baiersbronn	$\overline{A}^1$ r^{te}	IV-48	1889	40	33	1/10				Grès bigarré		695k					42		53	
Huzenbach		III-206	1889	41.50	35	1/7.44				Grès		»					40		52	
...lyria	$\widehat{A}^1$ r^{te}	III-46	1886	45.72		1/5.55				Grès	Elyria	437k	Portland		1000l	6.4	19.7		24.1	
Céret	$\widehat{A}^1$ Fr	II-160	1883-85	45		1/2.31				Granit		571 à 735k	Grappier Lafarge	1000k			Pr. maxima : 27k			
Montanges	$\widehat{A}^1$ r^{te}	III-62	1908-09	80.29		1/3.92		L		Calcaire	Villette-Romanèche (Ain)	1974k	Artificiel Vicat n° 1	600k	[24-25/26]	12	43.8		50.2	
Canale	$\widehat{A}^n$ Fr	III-185	1904-06	40		1/5				Calcaire	»	»		590k			Pr. maxima : 35k			
Krummenau	$\widehat{A}^1$ Fr	III-164	1910-11	63.26		1/4.57				Grès calc. mollasse	»	1200k	Portland	»	333l	10 à 60	36.2 [17]	23.6 [17]	46.2 [17]	23.1 [17]
...ouard VII	E^n r^{te}	I-182	1901-03	40.54		1/5.43		[27]		Granit	»	»		»						
Bellows-Falls	$\overline{A}^1$ Fr	III-225	1899	42.67		1/7		[27]		»	»	»	Portland	»			50.5		76	
Wiesen	E^1_h fr	I-235	1907-09	55		1/1.65	PT Granit	B moulé		1' - 1'8 - 3'5		332 à 404k à 28 jours		400k [28]			20.2		23.6	
Luxembourg	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1$ r^{te}	II-67	1899-1903	84.65		1/2.73				Grès	Gilsdorf	1193 à 1599k	Artificiel Vicat n° 1		[29]		29	23	48	20
...ucicaut		243	1888-90	40		1/8				Calcaire	Villebois	1096k				8		19.9		
...rléans	$\overline{A}^n$ r^{te}	III 255	1904-06	43.85		1/7.56	PT		MAV		*Bandeaux et Douelle* Massangis; *Queutage* Ancy-le-Franc, Larrys, Chassigneules	710k; 600 à 1100k	lent; Candlot	600k			29.6	19.7	39.5	19.6
...vignon		270	1905-09	40		1/8					Ruoms		Maritime Pavin de Lafarge			Bx 10 Corps 25 à 30	31.5		37.2	
Constantine	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1$ r^{te}	II-107	1908-12	68.76		1/2.76					»		Artificiel Vicat de Valdonne			12 à 16	29	»	»	»
Cinnskel	$\widehat{A}^1$ fr	II 189	1910-12	46.98		1/2.32	MAV			Granit	»			350k			22.8	17.5	24.5	20.4
Tuoi		194	1911-12	47.71		1/2.23					»									

13. — Voir renvoi 8. 14. — Voir renvoi 9. 15. — A la clef et aux retombées, 1500k. 16. — Au-dessous du milieu de la montée, 300k.
17. — En tenant compte de la température. 18. — Résistance du mortier en cubes : 255k. 19. — Sable de l'Isonzo, lavé.
20. — Sable de la Gutach. 21. — Grès poreux, gélif. 22. — 11 % de mortier.. 23. — 23 % de mortier. 24. — 250 à 3[illegible]k à 28 jours.
25. — Mortier avec très peu d'eau. 26. — Sable de la Valserine. 27. — Voussoirs de toute l'épaisseur de la voûte.
28. — Résistance du mortier au 1/3 : 426k à 28 jours. 29. — Sable : laitier granulé.

Pont	intrados Voie portée [30]	Monographie Tome, page	Date	Portée entre appuis	Portée aux retombées ou entre rotules	Surbaissement	Composition de la voûte — Appareil [31] Bandeaux	Douelle	Queutage	Pierre Nature	Provenance	Résistance en Kg 0^m01^2	Ciment Nature Provenance	Pour 1m³ de sable Poids en Kg	Volume en lit.	Épaisseur des joints, en mm	Pressions kg 0 — Clef maxima	Clef moyenne	Reins maxima
				m	m											Bx / Dlle			
du Castelet		II 130	1882-83	41.20		1/2.94				Granit	Ax					12 / 20		14k	
de Lavaur	$\widehat{A}^1$ F^r	II 135	1882-84	61.50		1/2.24	PT	MEV		Calcaire	Baudeaux: Querey » ; Douelle et Queutage: Lexos	720 à 1127k	Artificiel	650k	[32]	10 / 15		17	MAX de la voûte 23k
Antoinette		II 145	1883-84	50		1/3.14				Granit	Sidobre	691 à 977k			[32]	10 / 12		18	id.
du Gour-Noir	$\widehat{A}^1$ F^r	III-103	1888-89	62	66	1/3.73					Cabirol			[33]			33k2	16.6	»
de Verdun-sur-le-Doubs	E^n r^{te}	I-165	1895-97	41		1/4.47	MAV		M E V	Calcaire	Baudeaux et Douelle: Ruoms ; Queutage: Remigny		Vicat					13.5	
de Valence	E^n r^{te}	I-173	1901-05	49.20		1/4.65	PT	MAV		Calcaire	Baudeaux et Douelle: Ruoms, Le Pouzin ; Queutage: Crussols, Variza		n° 1	600k			27.9	18.8	30.6
des Amidonniers	E^nE^n r^{te}	I-193	1904-07	46 et 42		1/4.17 et 1/4.80	PT	MEV		Calcaire	Vianne					[34] Joints minces	40	27	50
d'Escot	$\widehat{A}^1$ F^r	II-174	1907-09	56		1/2.99	MAV	MEV		Calcaire	»		Laitier				36.3		37
de Marbach	$\bar{A}^1$ r^{le}	IV-45	1886-87	43.50	32	1/10.32	PT	MEV		Baudeaux: Calcaire Keuper ; Douelle et Queutage: Muschelkalk		577 à 644k ; 992 à 1169k			500l		27		25
de Freyssinet	$\widehat{A}^1$ F^r	III-112	1890-91	45		1/4.09	PT			Granit	»	»	Boulogne	500k					
de Rebuzo	C^1 F^r	I-48	1898-1900	40		»		MEV		Calcaire		Baudeaux et Douelle 1900k ; Queutage 1700k	Grappier du Teil	[35]				11.4	
de Ramonnails	$\widehat{A}^1$ f^r	II-186	1906-08	40.30		1/3.12				»			»	400k			23.2	11.6	20.2
de Brent	C^1 r^{te}	I-34	1899-1900	44		»	MAV	M E V		Baudeaux et Douelle Calcaire				[37]				13	
sur le Verdon	E^1 F^r	I-133	1905-06	40		1/4	PT			»			Artificiel lent	»	»			14.5	
de Lichtensteig	$\widehat{A}^1$ F^r	III-161	1907-09	42.82		1/3.71	MEV			Grès calc.			Portland	»	333l		27.5		28.9
de l'Alma	E^n r^{te}	I-153	1854-55	43		1/5	PT	MAV	M O V	Douelle et Queutage Meulière			Vassy		1000l				
de Claix	$\widehat{A}^1$ r^{te}	III-36	1873-74	52		1/6.46		MEV					Artificiel Vicat n° 1	1000k				19k	
sur le Rothweinbach	$\widehat{A}^1$ F^r	II-171	1904-06	41		1/2.68	MEV			Calcaire				500k env. (1/3 en poids)			Pr. maxima :		
sur le Krenngraben	$\widehat{A}^1$ F^r	III 134	1904-05	40		1/4				Baudeaux et Douelle: Calc. dur ; Queutage: Granit			»				Pr. maxima :		
de Lusserat		III 155	1908-10	45.70		1/4.63	PT	MAV		Calcaire			Portland de Boulogne	450k		10 à 30	28	18	25
sur le Palmgraben	$\widehat{A}^1$ F^r	II-164	1904-05	49		1/3.39		PT		Grès							Pr. maxima :		
de Solis	C^1 f^r	I-55	1901-02	42		»	MEV			Calcaire				400k			23.2		20.3
de Saint-Sauveur	C^1 r^{le}	I-27	1860-61	42		»	PT	MOV [38]		Schiste			Vassy						
de Mantes	E^n r^{te}	I-160	1873-75	40		1/3.5	PT			Baudeaux et Douelle ; Queutage: Meulière	Tessancourt, Saillancourt		Portland Lonquéty de Boulogne						
de Berdoulet	$\widehat{A}^1$ F^r	II-128	1860-61	40		1/3.44	L												
de Chemnitz	$\widehat{A}^1$ F^r	III-129	1901-02	45		1/5.23	»												
de Gohren	$\bar{A}^1$ r^{te}	IV-139	1903-04	60		1/8.88	Crépi avec joints simulant la PT	M O V							400l		35.7	34.9	40.2
de Plauen	$\widehat{A}^1$ r^{te}	III-52	1903-05	90		1/5				Schiste dur (Phylitte)		1580k	Cerveau : Stern ; Reins et Culées : Vorwohler		Cerveau 333l ; Reins 250l		32.4		53.4 ; 69 [39]
de Wengern		III 207	1904	50		1/9.10												20k	
de Ziegennals		III 208	1905	40		1/9.52													
de Michelau	$\bar{A}^1$ r^{le}	III 209	1905-06	42		1/8.07											22		29.4
de Neuhammer		III 211	1906	52		1/8.7													
de Schwusen		III 213	1907	48		1/8.35									333l				
de Kupferhammer		III 214	1907	48		1/8.35											Pr. maxima :		
de Krappitz		III 265	1905	50		1/8.33													
de Gross-Kunzendorf	$\bar{A}^n$ r^{te}	III 267	»	40		1/9.52													
Saint-Pierre	E^1 r^{te}	I-120	1886	40		1/3.33	PT			Calcaire	Lexos	800k						11.5	
de Putney	$\bar{A}^n$ r^{le}	III-239	1882-83	43.89		1/7.46	PT			Baudeaux Granit			Portland						

30. — Voir renvoi 8. 31. — Voir renvoi 9. 32. — Sable de l'Agout. 33. — Au-dessous de 48^m40, ciment 800k. 34. — Sable de la Garonne.
35. — Au-dessous [illegible] 36. — Sans surcharge. 37. — Au-dessous de [illegible] chaux [illegible]. 38. — 5 chaînes de pierre de taille. 39. — Voir renvoi 17.

CHAPITRE III

MATÉRIAUX

§ 1. — *PIERRES*

Art. 1. — Nature. — Dans les grandes voûtes, on a employé à peu près toutes[40] les pierres naturelles, sauf les tendres[41, 42] : granit[44], gneiss[45], schiste[46], basalte[43], lave[47], calcaire[48], grès[49], meulière[50]..., toutes les artificielles : briques[51], béton moulé[52], béton damé[53].

Art. 2. — Écarter les matériaux sensibles aux intempéries. Il faut écarter les matériaux qui craignent la gelée, la pluie, l'humidité[54], l'air salin[55], les fumées[56]...

On étudiera utilement les pierres des cimetières : elles sont fort exposées au froid, à l'humidité, et portent une date.

S'il n'y a dans le pays que des pierres gélives, on les entourera de pierres qui ne gèlent pas[57].

40. — Voir les tableaux du chapitre II. 41. — Vieux Pont de Lavaur en grès mollasse tendre (I, p. 97).

42. — Viaduc sur lequel la ligne de Paris à Bordeaux traverse, près de Libourne, la vallée de la Dordogne. 100 arches de 10^{m} en anse de panier au 1/3, en calcaire tendre, de 0^{m}70 à la clef. Construit de 1846 à 1850. De nombreuses lézardes ont apparu dès les premières années, puis augmenté avec le poids et la vitesse des trains.

En 1900, il y en avait près de 150 ; certaines avaient 5, 6^{m} de long, 15 à 20^{mm} de large ; la plupart parallèles aux têtes, les plus grandes près de l'axe. Les pierres, le mortier, se sont écrasés, effrités, sous les trains.

Revue Générale des Chemins de fer, février 1913, p. 87 et suivantes : « *Consolidation par injection de ciment du Viaduc des Cent arches* », M. Adam, Ingénieur de la Cie d'Orléans.

43. — Viaducs d'Auvergne.

Voûtes appareillées ⩾ 40^{m}, tout ou partie en :

44. — *Granit.*

Ponts :	Portée	Monographie Tome	Monographie Page
Kreungraben	40^{m}	III	134
Edouard VII	40.54	I	182
Castelet	41.20	II	130
Empereur-François	42.34	I	168
Gravona	43.53	II	183
Putney	43.89	III	239
Mosca	45	III	199
Céret	45	II	160
Freyssinet	45	III	112
Nydeck	45.90	II	51
Londres	46.33	I	147
Tuoi	47.71	II	194
Pouch	47.85	III	110
Victoria	48.77	II	201
Antoinette	50	II	145
Schalchgraben	52	II	168
Wiesen	55	I	235
Langenbrand	59	III	152
Cabin-John	67.10	III	75
Morbegno	70	IV	65
Steyrling	70	III	137

45. — *Gneiss.*

Ponts :	Portée	Tome	Page
Boïlefos	40	III	159
Strandeelven	41	III	132

46. — *Schiste.*

Ponts :	Portée	Tome	Page
St-Sauveur	42	I	27
Pont-y-tu-Pridd	42.67	III	26
Plauen (schiste dur, phylitte)	90	III	52

47. — *Lave.*

Ponts :	Portée	Tome	Page
Vieille-Brioude	45	I	23

48. — *Calcaire.*

Ponts :	Portée	Monographie Tome	Monographie Page
Rébuzo	40^{m}	I	48
Fium' Alto	40	I	110
St-Pierre	40	I	120
Krenngraben	40	III	134
Canale	40	III	185
Boucicaut	40	III	243
Avignon	40	III	270
Verdun-sur-le-Doubs	41	I	165
Rothweinbach	41	II	171
Vizille	41.08	I	93
Solis	42	I	55
Marbach	43.50	IV	45
Orléans	43.85	III	255
Cornelius	44	IV	180
Lusserat	45.70	III	155
Maximilien	45.87	IV	192
Amidonniers	46	I	193
Claix (Vieux Pont)	46.35	II	42
Cinuskel	46.98	II	189
Vérone	48.70	III	173
Valence	49.20	I	173
Escot	56	II	174
Chester	60.96	III	29
Lavaur	61.50	II	135
Prince-Régent	62.40	IV	239
Max-Joseph	64	IV	242
Constantine	68.76	II	107
Montanges	80.29	III	62
Salcano	85	III	141

52. — *Béton moulé.*

Ponts :	Portée	Tome	Page
Wiesen	55	I	235

53. — *Béton damé.*

Voir plus loin, Titre II.

49. — *Grès.*

Ponts :	Portée	Monographie Tome	Monographie Page
Baiersbronn	40^{m}	IV	48
Worochta	40	III	120
Hofen	41	IV	41
Huzenbach	41.50	III	206
Pont-y-tu-Pridd	42.67	III	26
Lichtensteig	42.82	III	161
Saulnier	43	III	40
Svenkerud	44	III	150
Flyria	45.72	III	46
Nydeck	45.90	II	51
Teinach	46	III	203
Londres	46.33	I	147
Jamna	48	III	118
Lavaur (Vieux Pont)	48.73	I	97
Victoria	48.77	II	201
Tournon	49.20	II	35
Palmgraben	49	II	164
Schwändeholzdobel	57	III	126
Chester	60.96	III	29
Krummenau	63.26	III	164
Gutach	64	III	122
Jaremcze	65	III	114
Cabin-John	67.10	III	75
Luxembourg	84.65	II	67

50. — *Meulière.*

Ponts :	Portée	Tome	Page
Mantes	40	I	160
Alma	43	I	153
Nogent-sur-Marne	50	I	79

51. — *Briques.*

Ponts :	Portée	Tome	Page
Maretta, Prarolo	40	III	93
Isola del Cantone	40	III	98
Diveria	40	III	130
Crespano	40.40	II	46
Calcio	42	III	100
Bains-de-Lucques	47.84	III	32
Vérone	48.70	III	173
Annibal	55	I	112
Diable	55	I	110

54. — L'ancien pont de Vieille-Brioude, tombé en 1822, était en tuf volcanique, s'effritant dans l'air humide (II, p. 17,-5, renvoi 12).

55. — Briques attaquées par l'air salin.

Giornale del Genio Civile, mars 1902 : p. 114 à 122 : « *Sulle corrosioni delle murature di matoni dovute alla presenza dei solfati alcalini.* »

56. — Grès de la cathédrale de Cologne attaqué par les fumées des usines, des locomotives, des bateaux.

Oesterreichische Wochenschrift fur den öffentlichen Baudienst, 28 septembre 1907, p. 616. « *Der Zahn der Zeit am Kolner Dome.* » J. L. Algermissen — Koln-Riehl.

57. — Ponts de Lavaur et Antoinette : les noyaux des piles, les massifs des culées enfouis dans le sol sont en grès tendre gélif.

Art. 1. — Sable. — On a employé du sable de rivière[58], de carrière[59], de la pouzzolane[60, 68], du laitier granulé[61] ; on a broyé du calcaire[62, 63, 64], du grès[65], du granit[66, 67, 68], du gneiss[68], du basalte[68], de la pouzzolane[67],.....

Art. 2. — Anciens mortiers de chaux grasse et mortiers actuels. Avant le XIXe siècle, on ne connaissait que la chaux grasse[69] et on lui demandait

58. — Lavaur, (II, p. 135), Antoinette (II, p. 145), Gutach (III, p. 122), Salcano (III, p. 141), Amidonniers (I, p. 193), Montanges (III, p. 62).....

59. — Sable de gore : Viaduc de Mussy (Ligne de Paray-le-Monial à Lozanne).

60. — Annibal (I, p. 112), Diable (I, p. 116), Viaducs de la ligne de Langogne au Puy (1904-08).

61. — Luxembourg (II, p. 67).

62. — Constantine (II, p. 107).

63. — *«... les maçonneries du canal de la Marne à la Saône... ont été exécutées en grande partie, en totalité même dans les dernières années, avec du sable artificiel obtenu par le broyage de pierres calcaires...*

Ce sable artificiel n'est pas suffisamment connu. Il est pourtant supérieur, à tous les points de vue, à presque tous les sables naturels. Les expériences comparatives poursuivies pendant vingt ans à nos laboratoires de chantiers et surtout au laboratoire dirigé avec tant d'autorité par M. Féret, à Boulogne-sur-Mer, ont été absolument concluantes à ce sujet. »

Génie Civil, 10 octobre 1908, p. 397, « *Le canal de la Marne à la Saône* », p. 396 à 400. M. O. Jacquinot, Ingénieur en chef des Ponts-et-Chaussées.

M. Canat, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et de la Cie P.-L.-M. a fait pour le grand viaduc de Caronte (Miramas-L'Estaque) de nombreux essais : chaux, sable siliceux des plages de Saint-Raphaël et Saint-Tropez, le meilleur du Sud-Est, — calcaire broyé : il a trouvé celui-ci 2 fois plus résistant.

Dans les essais faits pour la ligne de Nice à Coni, le calcaire broyé, avec ciment Pelloux, a été trouvé 3 fois plus résistant que le sable fin du Var.

M. Bied, Directeur du Laboratoire Pavin de Lafarge a reconnu de même que le sable concassé de Notre-Dame de la Garde valait mieux que le sable de mer.

64. — Lignes de Miramas à L'Estaque, de Morez à Saint-Claude, de Frasne à Vallorbe, de Nice à Coni.

65. — Viaducs de la ligne de Limoges à Brive.
(Rapport sur la Construction des Travaux, p. 29, 34.)

66. — Lignes de Saint-Bonnet à Craponne, d'Arlanc à Darsac.

67. — Ligne de Langogne au Puy.

68. — Ligne de Brioude à Saint-Flour.

69. — Voici les résistances à la compression des anciens mortiers et des nôtres :

	Liants	Expériences faites au Laboratoire :	Mortier — Composition	Mortier — Consistance	Résistance, en kg/$\overline{0^m 01}^2$, à — jours 7	mois 1	mois 3	mois 6	ans 1	ans 1½	ans 2	ans 3	ans 16
anciens	Chaux grasse de Marly employée au Panthéon	» par Rondelet en 1787 et 1802	Chaux 1vol, Sable 1vol5	non battu						31			
				battu						42			47
			Chaux...... 1vol, Tuileau pilé 1vol5	non battu						48			
				battu						65			81
modernes — chaux	du Teil (Lafarge, ficelle blanche)	de la Société Pavin de Lafarge	Sable normal de Leucate 1mc et chaux 250k	plastique		13	22	42					
			Sable normal de Leucate 1mc et chaux 300k	plastique		17	33	45					
			Sable normal de Leucate 1mc et chaux 350k	plastique		18	34	52					
			Chaux 1k, Sable 3k (environ 500k de chaux pour 1mc de sable)	plastique	10	30	83	117	141	171	176	177	
					moyenne de 4.000 essais			moyenne de 200 essais					
	du Teil - maritime			plastique	88	132	217	290	303	330	302	365	
modernes — ciments	du Teil Lafarge n° 1 ficelle blanche		Ciment 1k Sable 3k (environ 500k de ciment pour 1mc de sable)	plastique	101	148	220	282	308	427	311	376	
					moyenne de 2.000 essais			moyenne de 100 essais					
	Artificiel Lafarge au four rotatif	des Arts et Metiers Paris, 1914			204	358	441						
	Artificiel Vicat n° 1 double cuisson	de l'Ecole des Ponts-et Chaussées Paris 1911 — en briquettes			291	356							
		de l'Ecole des Ponts-et Chaussées Paris 1911 — en cubes			186	251							
		de la Société Vicat (pendant 8 ans) — en cubes			135	210	325		367				
	Allard et Nicollet	des Arts-et Métiers Paris 1902			194	273	363		425				
		de l'Ecole Polytechnique de Zurich — 1908			121	210							
	Demarle - Lonquéty Usine de la Souys près Bordeaux	des Arts-et-Metier Paris 1911 — en briquettes			237	425	418						
		des Arts-et-Metier Paris 1911 — en cubes			125	247	343						

tout autant[70] qu'aujourd'hui aux excellents ciments que nous devons à Vicat.

Les grandes voûtes du XVIIIe siècle sont en pierre de taille à joints minces.

De nos excellents mortiers, on peut accepter beaucoup plus dans les voûtes.

La plus grande, celle de Plauen, est en tout petits matériaux de 10 à 12^{cm} d'épaisseur : elle contient 45 % de mortier.

On demande de plus en plus au mortier, de moins en moins à la taille.

Art. 3. — Augmentation de résistance du mortier en joints minces. — Les essais de laboratoire donnent la résistance à l'écrasement r du mortier en briquettes normales de 22^{mm} d'épaisseur : en joints de 10^{mm} à 15^{mm}, elle dépasse $1{,}20\ r$ [71].

Art. 4. — Faire au ciment les grandes voûtes. — Toutes les voûtes de 40^{m} et au-dessus ont été construites : avant 1854, à mortier de chaux ; après 1890, à mortier de ciment à prise lente [72].

Nous avons fait en chaux, des pleins cintres de 25^{m}, 27^{m}, 35^{m} ; mais en ciment, des arcs de 33^{m} à 1/7,5..... On ne fera qu'en ciment une voûte de 40^{m}.

Art. 5. — Dosages usuels pour un m. c. de sable.

A. Chaux [73] : 400^{k} [73, 74], 350^{k} [73], 333^{k} [75], 300^{k} [76] ;

B. Ciment [77] : 700^{k}, 650^{k}, 600^{k}, 500^{k}, 400^{k}, 350^{k} [78], 333^{k}.

On cherchera, dans chaque cas, le dosage du liant et le sable qui donne le plus de résistance [79].

70. — Ponts de : Trezzo (1370-77, détruit en 1416, — $72^{m}25$), (III, p. 19) ; Vieille-Brioude (1454, tombé en 1822 ; — $54^{m}20$) (II, p, 15) ; Lavaur (1773-1790, — $48^{m}72$) (I, p. 97) ; Gignac (1777-1810, — $48^{m}42$) (I, p. 103).

71. — Briquettes en **8** de 22^{mm} d'épaisseur, $35^{cq}3$ de surface horizontale, 5^{cq} de section transversale au milieu.

Quand on écrase des cubes de mortier, les faces latérales « soufflent ». En briquettes normales de 22^{mm} d'épaisseur, le mortier résiste déjà de 1 fois 1/2 à 2 fois, comme en cubes ; en joints très minces, c'est-à-dire sans surfaces latérales pouvant souffler, le mortier, retenu par frottement entre les deux lits de la pierre, résiste de 2 à 4 fois comme en cubes. — Voici le résumé des essais faits à l'École des Ponts, sur du mortier de ciment de Boulogne (Demarle et Lonquety) au dosage en poids de 1 de ciment pour 3 de sable normal (500^{k} par m. c. de sable) à consistance plastique.

			A 28 JOURS	A 84 JOURS
Charge d'écrasement.		en cubes de $0^{m}07$	95 k.	142 k.
		en briquettes normales en **8** de 22^{mm} d'épaisseur	170 k.	»
		Rapport à la résistance en cubes	1,8	»
Charge produisant un commencement de désagrégation.	En joint de 15^{mm}	comprimé	188 k. à 270 k.	272 k. à 305 k.
		Rapport à la résistance. en cubes de $0^{m}07$	2 à 2,8	2,8 à 3,2
		Rapport à la résistance. en briquettes en **8**	1,1 à 1,6	1,6 à 1,8
	En joint de 10^{mm}	comprimé	224 k. à 283 k.	270 k. à 389 k.
		Rapport à la résistance. en cubes de $0^{m}07$	2,4 à 4	2,8 à 4,1
		Rapport à la résistance. en briquettes en **8**	1,3 à 1,4	1,6 à 2,3
		non comprimé	182 k. à 238 k.	205 k. à 332 k.
		Rapport à la résistance. en cubes de $0^{m}07$	1,9 à 2,5	2,8 à 3,5
		Rapport à la résistance. en briquettes en **8**	1,1 à 1,4	1,6 à 2

Communication faite par M. H. Tavernier, au Congrès des méthodes d'essais tenu à Paris du 9 au 16 juillet 1900.

72. — sauf, en 1901-02, celle en briques, de 40^{m}, sur la Diveria (III, p. 130), qui est à mortier de chaux (Voir Chap. II, § I).

73. — Voir Chap. II, § I.

74. — Ouvrages à mortier de chaux de la ligne du lac de Constance au lac de Zurich : chaux 1^{vol}, sable 2^{vol}.

75. — Viaduc de Mussy (arches de 25^{m}), Ponts de l'Arconce (25^{m}), du Sornin (35^{m}). (Ligne de Paray-le-Monial à Lozanne),.....

76. — Avec la chaux du Teil, on est descendu à 250^{k} aux viaducs de la ligne de Limoges à Meymac, pour les tympans du pont de Luxembourg (II, p. 69, 12-*B*), à 200^{k}, même à 150^{k} pour des maisons.

77. — Voir Chapitre II, § 3 et 3 bis.

78. — Les voûtes du Métropolitain sont en meulière ou en pierre de Souppes à mortier de ciment de laitier : 350^{k} pour 1^{mc} de sable.

79. — Voir les essais faits pour le Pont de Luxembourg (II, p. 69).

Art. 6. — Mortiers bâtards (chaux et ciment) [80, 81, 82]. — On peut accepter le mélange, mais à condition qu'il soit très intime, c'est-à-dire que les deux poudres, chaux et ciment, soient mélangées mécaniquement avant usage.

Art. 7. — Fabrication. — Pour les grands ouvrages, on fera le mortier au manège (roues broyeuses pesant au moins 25^k par $\overline{0^m01}^2$ de largeur de jante).

Art. 8. — Protection du mortier.

A. - Contre la gelée. — Quand il faut maçonner par le froid, on ajoute à l'eau du mortier du carbonate de soude (1^k de sel anhydre pour 12 litres d'eau) : cette dissolution ne gèle pas à — 12° [83].

Pendant quelques mois, le carbonate [84] maintient humides les maçonneries : ce n'est un inconvénient que pour les murs à enduire de plâtre.

B. - Contre les eaux contenant du sulfate de chaux. — Les eaux gypseuses ramollissent les mortiers, les mettent en bouillie.

Il faut :

1° – les écouler promptement par des chemises à pierres sèches séparant complètement les maçonneries des terrains gypseux. On ne mettra pas de maçonnerie à mortier en contact direct avec le gypse ou les remblais gypseux [85].

2° – n'employer que du gros sable (2^{mm} à 5^{mm}) : les mortiers de sable fin se laissent plus facilement attaquer.

3° – avoir des mortiers très pleins et compacts [86], pour que l'eau n'y puisse pas entrer : du gros sable sans gypse, du ciment inattaquable par le gypse [87, 88] ; faire le mortier au manège avec de l'eau sans gypse.

80. — Voir le Tableau, Chapitre II, § 2.

81. — Viaduc de Pompadour (1873-75) (Ligne de Limoges à Brive - Voûtes de 25^m). — Sur 6^m de chaque côté de la clef, on a ajouté à la chaux 150^k de ciment Portland par m. c. de mortier. *(Rapport sur la Construction des Travaux*, p. 29).

82. — Pont de Mauzac sur la Dordogne (1877-79) (Ligne de Bergerac au Buisson - 7 arches en ellipse ; Portée 30^m, montée 9^m20). Sur 4^m de chaque côté de la clef, on a ajouté à la chaux 200^k de ciment Portland par m c. de mortier. *(Rapport sur la Construction des Travaux*, p. 23).

83. — Ont employé avec succès ce procédé, les Compagnies de l'Est, de l'Ouest, d'Orléans, PLM.

Les mortiers carbonatés se recouvrent d'efflorescences blanches : elles disparaissent au bout d'un ou de deux ans.

La dissolution du sel se fait dans une grande marmite où l'eau est portée à 40° : c'est là qu'on la puise pour faire le mortier.

Avec le sel hydraté (le « cristau » des ménagères), au lieu du sel anhydre, il faut 1^k de sel pour 4 litres d'eau.

84. — On a employé aussi le sel (une solution à 20 % gèle à — 14°), le chlorure de calcium...

85. — On rencontre souvent le gypse : en France (Lignes de Saint-Girons à Foix, d'Anduze à Saint-Jean-du-Gard, de Moûtiers à Bourg-Saint-Maurice, de Nice à Coni,...) ; en Algérie ; en Espagne (Ligne de Linarès à Almeria).

Depuis qu'on y veille, on trouve du gypse plus souvent qu'on ne le souhaite.

86. — Par des essais, on détermine pour chaque sable le dosage du liant qui donne la « compacité » maxima (volume du liant + volume du sable dans l'unité de volume du mortier). Ç'a été 600^k (ciment Pelloux n° 2) pour le calcaire broyé employé sur les lignes de Frasne à Vallorbe, et de Nice à Coni.

87. — Dans le gypse et l'anhydrite, nous avons employé le ciment « indécomposable » Lafarge aux dosages de 500^k et 600^k pour les maçonneries, de 800^k pour les chapes, — puis le ciment Pelloux « spécial n° 2 » aux dosages de 450^k, 600^k, 650^k, 780^k pour les maçonneries, de 800^k pour les chapes.

En Algérie, dans les eaux très sulfatées, M. l'Inspecteur général L. Godard met par m. c. de sable 1000^k de ciment maritime Lafarge.

88. — Le ciment qui résiste aux eaux sulfatées résiste moins que d'autres à l'écrasement.

Art. 9. — Joints du parement. — Dans les parements en bonne pierre, les joints en mortier sont la partie faible [89]. Il faut les tenir en arrière, — « rejointoyer » à plat, en creux, — et non pas, comme on l'a trop souvent fait, soit à niveau, soit surtout en saillie : c'est laid et cela part au premier hiver.

On rejointoye à fleur de pierre : les pierres tendres, elles ne résistent pas plus que le mortier, il n'y a plus de raison de le tenir en arrière ; les moulures, pour ne pas en interrompre les lignes.

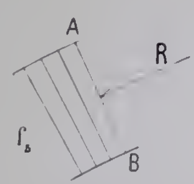
La couleur du joint doit aller avec celle de la pierre : joints clairs sur les archivoltes moulurées blanches ; joints foncés sur les pierres noires.

CHAPITRE IV

DISPOSITION DES MATÉRIAUX. — APPAREIL

§ 1. — *PARTOUT, DANS UN OUVRAGE, ON DOIT DISPOSER LES MATÉRIAUX PAR ASSISES NORMALES A LA PRESSION*

Art. 1. — Pourquoi ? — Considérons une section quelconque A B dans une voûte, une pile, une culée : soit R la résultante des actions qui agissent sur elle (f_5).

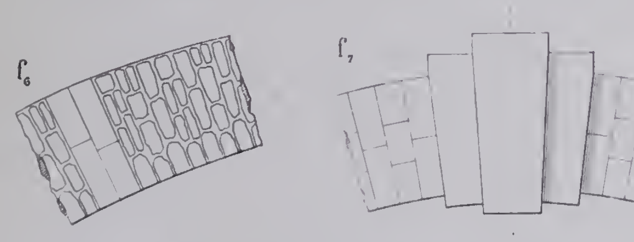


Les matériaux, pour ne pas glisser, doivent être disposés perpendiculairement à R.

Si, dans l'assise A B, il y a des parties plus compressibles, elles tendront à s'enfoncer par rapport aux autres, à s'en séparer.

Donc, n'avoir dans une assise que des matériaux également compressibles.

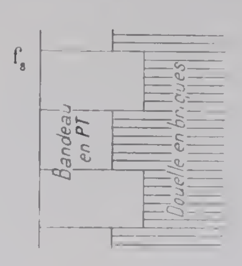
Normalement à R, on peut, comme on veut, changer l'appareil : par exemple, traverser une voûte en moellons bruts, par des chaînes de pierre de taille (f_6) ; placer au sommet, des clefs et contre-clefs plus épaisses (f_7) ; couper une pile de viaduc en moellons bruts par des assises de libages, faire un mur d'assises superposées de béton, de galets, de moellons, de briques, de pierres de taille.

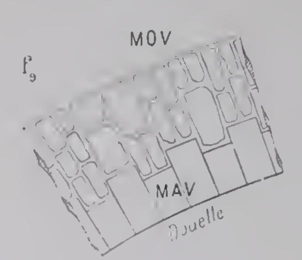


89. — Les Grecs, les Romains posaient sans mortier les pierres de taille : il n'y en a pas au Parthénon, au Pont du Gard.

Art. 2. — Danger de faire autrement.

— Mais il peut être dangereux de changer les matériaux parallèlement à la résultante R ; par exemple dans une voûte surbaissée ou de grande portée, d'avoir des bandeaux de pierre de taille, c'est-à-dire avec peu de joints et des joints minces, et un corps en briques qui en a beaucoup [90] (f_8) ;





ou bien de « queuter » une douelle en pierre de taille ou en moellons d'appareil par des moellons bruts, qui ont plus de joints et des joints plus épais (f_9).

Il y aura tendance à séparation derrière les parties qui tassent moins, c'est-à-dire entre le bandeau et le queutage, entre la douelle et le queutage, entre le bandeau et la douelle [91], tendance à écrasement du bandeau, qui tasse moins [90, 92, 93].

Art. 3. — Règle pratique pour la direction des assises.

— Les assises devraient être normales à la courbe de pression ; on tâchera d'obtenir, par des tracés appropriés de l'intrados et de l'extrados, qu'elle se confonde avec la fibre moyenne.

Mais, si on disposait les assises suivant des plans normaux à la fibre moyenne [94], on aurait des angles aigus à l'intrados.

En pratique, on appareille normalement à l'intrados.

§ 2. — *MATÉRIAUX DES TROIS PARTIES DE LA VOÛTE, BANDEAUX, DOUELLE, QUEUTAGE*

Art. 1. — Bandeaux.

A. - Appareil. — Ils sont toujours en moellons d'appareil ou en pierre de taille ; dans les villes, toujours en pierre de taille, soit de petit échan-

90. — Au pont de Belleperche, sur la Garonne (Ligne de Castelsarrasin à Beaumont), ellipses de 33^m, le corps est en briques, les voussoirs du bandeau en craie tendre de Chancelade (1 pour 3 briques) : au décintrement, il y en eut de fendus, d'écornés, d'éclatés.

91. — Pont Saint-Jean à Saubusse, - ellipses de 24^m à 1/3.2, - mortier de chaux, bandeaux en PT, douelle en MA, queutage en MOV. Au décintrement de la 2e arche, le 13 mai 1881, 35 jours après clavage, la douelle descendit à la clef de 40^{mm} de plus que les bandeaux, et s'en sépara sur 4^m de part et d'autre du sommet.

Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1885, p. 645 à 659. « *Note sur la construction du Pont Saint-Jean sur l'Adour à Saubusse (Landes)* », M. Trépied, Ingénieur des Ponts-et-Chaussées.

92. — De même la façade en grandes pierres de taille des maisons tend à se séparer des murs intérieurs en briques ; de même, dans un mur en moellons bruts, coupé par une chaine verticale de pierres de taille, il y a souvent décollement le long de la chaine.

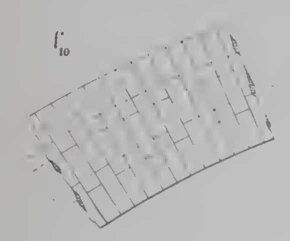
93. — On a souvent revêtu les souterrains avec douelle en moellons d'appareil (MAV) et queutage en moellons bruts liés (MOV), - queutage difficile à bien faire. Nous les faisons maintenant tout en MOV.

94. — On a fait ainsi, un peu à tort, au pont des Amidonniers, pour ne pas avoir d'angles trop aigus à l'extrados aux reins.

tillon, soit de grand, plus monumental, plus difficile à poser et, en général, plus cher.

Dans les voûtes en plein cintre, les bandeaux ont une épaisseur uniforme : on les fait avec les mêmes moellons [95].

Quand ils ne sont pas extradossés parallèlement, la longueur des moellons varie en chaque point. Pour un pont de luxe, on fera diminuer, de façon continue des naissances à la clef, les épaisseurs, hauteurs et queues en douelle des moellons de bandeau : on règlera les joints suivant des courbes continues bien ajustées à l'intrados et à l'extrados [96, 97, 98].

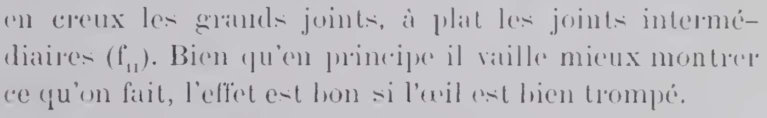


f_{10}

Aux ponts de Luxembourg [99] et des Amidonniers [100] (f_{10}), l'épaisseur des moellons en douelle est le 1/6 de celle des voûtes.

Ces épures ne laissent pas d'être un peu compliquées.

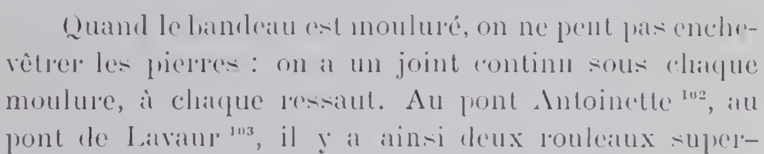
Aux ponts de Chalonnes et de Nantes, on a, pour figurer de la pierre de taille, groupé les moellons par 4, creusé des refends de deux en deux assises, rejointoyé en creux les grands joints, à plat les joints intermédiaires (f_{11}). Bien qu'en principe il vaille mieux montrer ce qu'on fait, l'effet est bon si l'œil est bien trompé.



f_{11}

On a fait ainsi aux voûtes latérales de Gignac [101].

Quand le bandeau est mouluré, on ne peut pas enchevêtrer les pierres : on a un joint continu sous chaque moulure, à chaque ressaut. Au pont Antoinette [102], au pont de Lavaur [103], il y a ainsi deux rouleaux superposés ; à Luxembourg [104], trois. Les pierres de taille du bandeau ne tiennent au reste que par leurs queues.



95. — Appendice : Viaducs.

96. — Aux ponts du Castelet (II, p. 130) de Lavaur (II, p. 135) et Antoinette (II, p. 145), les hauteurs des voussoirs sont définies par des arcs de cercle leur donnant des découpes :

	Castelet	Lavaur	Antoinette
à la clef, de	0m 15	0m 14	0m 14
aux retombées, de	0m 375	0m 17	0m 20

97. — On ne l'a pas fait aux Amidonniers (I, p. 193) : je l'ai un peu regretté.

98. — Au pont de Lavaur (II, p. 135), les moellons d'appareil (MAV) du bandeau ont :

		Naissances	Clef
Épaisseur		0 m 228	0 m 185
Queues en douelle	boutisses	0 m 52	0 m 43
	carreaux	0 m 35	0 m 29

99. — II, p. 67. 100. — I, p. 193. 101. — I, p. 103. 102. — II, p. 145 - f_8.

103. — II, p. 136 - f_{13}. 104. — II. p. 68^IV - f_{11}.

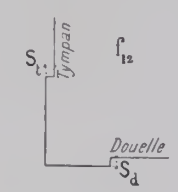
B. — *Pierre de taille simulée.* — Sur un placage de mortier, on a parfois tracé des joints et simulé du grand appareil à des têtes de voûte en petits moellons irréguliers [105], en béton [106].

Ce n'est pas à conseiller : l'œil n'est pas trompé, et ce gros appareil rapetisse les voûtes [107].

C. - Saillie.

C_1. - En douelle. — La saillie en douelle S_d (f_{12}), trop souvent acceptée, n'a que des inconvénients.

Elle augmente un peu la dépense et impose quelque sujétion dans l'exécution des voûtes.



Elle diminue sans profit l'ouverture utile, dessine une deuxième arête à côté de la seule qu'on doive voir.

C_2. - Sur les tympans. — Mais la saillie S_t (f_{12}) sur le nu du tympan accentue utilement le bandeau, le détache du tympan [108].

Quand l'aspect n'importe pas, pour les ouvrages courants, aqueducs, passages inférieurs, petits viaducs, on la supprimera.

Art. 2. — Douelle (f_{13}). — Elle doit être tout entière en moellons équarris ou d'appareil, par assises de même queue : la découpe est entre deux assises et non pas entre deux moellons d'une même file [109]. Il y faut tenir la main.

Art. 3. — Queutage.

A. - Faibles pressions. — Alors, on a peu à craindre des inégalités de tassement ; on peut accepter, par économie, un queutage en moellons bruts (MOV) au-dessus d'une douelle ou en arrière de bandeaux en moellons d'appareil (MAV) ou en moellons équarris (MEV), même un corps en béton avec parement en moellons d'appareil.

On a fait en moellons bruts (MOV) à mortier de chaux des queutages de pleins cintres de 35m [110], d'ellipses de 30m au 1/4 [111], de 36m à 1/3,6 [112], de 40m à 1/3,8 [113] ; encore en MOV, mais à mortier de ciment [114], le pont d'Iguerande

105. — Ponts construits par MM. Liebold : Plauen (III, p. 52), Wengern (III, p. 207), Ziegenhals (III, p. 208), Michelau (III, p. 209), Neuhammer (III, p. 211), Schwusen (III, p. 213), Kupferhammer (III, p. 214), Krappitz (III, p. 265), Gross-Kunzendorf (III, p. 267), Chemnitz (III, p. 129), Göhren (IV, p. 139).

106. — Munderkingen (IV, p. 55), Grasdorf (IV, p. 129), Walnut-Lane (II, p. 83).

107. — Chemnitz (III, p. 129), Göhren (IV, p. 139).

108. — Au pont en béton de l'Avenue Edmondson (I, p. 122), le bandeau et les tympans ne font qu'un ; les voûtes apparaissent comme découpées dans un mur en béton.

109. — On ne « découpera » pas dans une même file, comme on l'a fait à Montanges (III, p. 67).

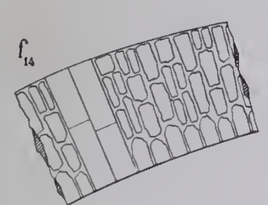
110. — Pont du Sornin (Paray-le-Monial à Lozanne). 111. — Ponts de Chalonnes et de Nantes. 112. — Pont de Marmande. 113. — Fium' Alto (I, p. 110).

114. — Voir le Tableau, p. 10.

sur la Loire [115] (arcs de 28^m60 à 1/7,62), le pont d'Arciat sur la Saône [116] (arcs de 31^m à 1/7,12), le pont d'Épinay sur la Seine [117] (ellipses de 38^m50 à 1/3,08).

Φ_1 — Pont d'Épinay sur la Seine, — 11 avril 1906





Pour réduire le tassement, prévenir ou limiter les fissures dans les voûtes à queutage plus compressible que la douelle, on pourrait les traverser par des chaînes de pierre de taille ou de moellons d'appareil (f_{14}).

B. - Fortes pressions. — Les pressions augmentant, il faut des matériaux de mieux en mieux équarris, de plus en plus résistants, à joints de plus en plus minces, en meilleur mortier. Il faut, surtout, qu'il y ait de moins en moins de différence de tassement entre la douelle, les bandeaux, le queutage, c'est-à-dire que les matériaux soient de plus en plus semblables.

Plus la voûte est hardie, plus il la faut homogène [118, 119].

115, 116. — Épaisseur à la clef $e_0 = \begin{cases} 0^m90 \\ 0^m97 \end{cases}$ Prix du m. c. de « MOV » $\begin{cases} 17^f50 \\ 24^f50 \end{cases}$

117. — Ligne de Saint-Ouen-les-Docks à Ermont.

118. — Voir les Tableaux, p. 8, 9, 10.

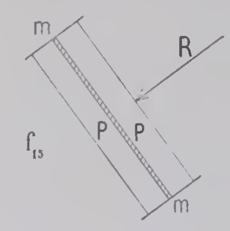
119. — La voûte d'expériences de Souppes (37^m881 à 1/17,8) était toute en pierre de taille. (III, p. 375, art. 2).

CHAPITRE V

TRAVAIL

§ 1. — *DISTINGUER ENTRE LES MAÇONNERIES APPAREILLÉES ET LES AUTRES*

Une maçonnerie faite d'assises de pierres P et de lits de mortier *m*, d'épaisseur uniforme, normaux à la pression R, résiste à l'écrasement comme le moins résistant de ses éléments : pierre P, mortier *m* (f_{13}).



Mais une maçonnerie de moellons bruts, qui n'a pas de lits, de joints réguliers, se fissurera, se disloquera, sous une charge très inférieure à celle qui écrase les pierres ou le mortier, charge qui dépendra de la disposition des pierres, de l'adhérence du mortier.

§ 2. — *TRAVAIL DANS QUELQUES VOÛTES APPAREILLÉES*

Les tableaux, p. 8, 9, 10, donnent, pour des voûtes appareillées de 40^m et plus, les efforts et la résistance de la pierre.

Les voûtes de 40^m (arc de cercle au 1/4) de Maretta et Prarolo [120], ont été construites en 1851-1852 avec des briques s'écrasant en moyenne à 54^k74. Au passage de deux trains, la pression atteignait à la clef 12^k51, soit les 23/100 de la charge d'écrasement des briques.

L'arche d'essai de Souppes [121] a donné sur la charge de rupture d'une voûte des renseignements très précieux et, jusqu'ici, bien peu mis à profit. C'était un arc de 37^m881 de portée, surbaissé à 1/17,8, en pierre de taille de Souppes s'écrasant, en moyenne, à 455^k, et mortier de ciment au dosage de 750^k, en joints de 12^{mm}. La contre-clef, diminuée au ciseau, tenait encore sous une pression de 399^k66 et ne s'est écrasée qu'à 468^k57, c'est-à-dire sous la charge même de rupture de la pierre.

§ 3. — *RAPPORT A ACCEPTER DANS LES VOÛTES APPAREILLÉES ENTRE LE TRAVAIL PERMIS ET LA CHARGE D'ÉCRASEMENT*

Art. 1. — Travail des moellons.

— Pour les ouvrages métalliques, le rapport du travail permis à la charge de rupture est :

120. — III, p. 93.

121. — Voir III, p. 375, art. 2.

25/100 pour les câbles des ponts suspendus [122] ;

27/100 pour les maîtresses poutres de plus de 30m d'ouverture [123].

Pour le béton armé [124], on admet les 28/100 de la résistance à l'écrasement à 90 jours [125] du même béton non armé.

Or, pour les ponts en pierre, — à l'inverse de ce qui a lieu pour les ponts métalliques et surtout pour les ponts suspendus, — la surcharge roulante est peu de chose à côté de la charge morte. Les efforts sont toujours dans le même sens et varient peu ; il n'y a pas d'effort instantané. Le temps, qui rouille le métal, qui desserre les rivets, durcit le mortier. On y pourrait réserver beaucoup moins de marge à l'imprévu.

Par contre, la répartition des efforts est encore mal connue dans les voûtes inarticulées.

Tout ceci permet de faire travailler les moellons d'une grande voûte, bien assisée, bien exécutée, dans les conditions les plus défavorables de surcharge et de température, au 1/4 de leur charge d'écrasement, — c'est-à-dire beaucoup plus qu'on ne le fait.

Art. 2. — Travail du mortier. — Bien que les mortiers durcissent avec le temps, on conservera la même limite de travail que pour les moellons, le 1/4 de la résistance à la rupture du mortier en joints minces, soit $0,3\,r$ [126], r étant la résistance des briquettes normales ayant l'âge des mortiers au jour prévu pour le décintrement ou pour l'ouverture à la circulation. Par exemple, dans une voûte à décintrer un mois après le clavage, exécutée en mortier de ciment résistant en briquettes d'un mois à 150k, on pourrait accepter une pression maxima au décintrement de 45k [127, 128].

122. — Cahier des Charges joint à la circulaire du 7 mai 1870, art. 4.

123. — Voici les chiffres du règlement du 29 août 1891, art. 2 :

	Fer laminé	Acier laminé
Charge de rupture à l'extension par $\overline{0^m001}^2$ .... $\rho =$	32k	42k
Limite de travail par $\overline{0^m001}^2$ dans les fermes principales des ouvertures de plus de 30m .... $\beta =$	8k5	11k5
Rapport .... $\frac{\beta}{\rho} =$	27/100	27/100

124. — Instruction du 20 octobre 1906, art. 4.

125. — Mesurée sur des cubes de 0m20.

126. — Voir Chapitre III, § 2, art. 3.

127. — Soit K la résistance à admettre pour la maçonnerie, h_1 celle de la pierre en cubes, h_2 celle du mortier en cubes :
On a employé au Pont de Salcano la formule $K = \frac{1}{3} h_1 + \frac{2}{3} h_2$ (Tome III, p. 144, renvoi 5).

128. — Voici les pressions en Kg $\overline{0^m01}^2$ admises suivant l'appareil et le mortier dans les voûtes de la ligne du lac de Constance au lac de Zurich * :

Mortier	Composition	Chaux hydraulique : 1vol Sable : 2vol				Ciment : 1vol Sable : 3vol			
	Age en mois	1	2	3	4	1	2	3	4
Moellons	bruts (MOV) (*Bruchstein*)	8k	10k	14k	18k	18k	22k	24k	26k
	équarris (MEV) (*Spitzstein*)	10	13	16	19	23	25	28	30
	d'appareil (MAV) (*Schichtenstein*)	10	14	18	22	26	30	32	35

* *Bodensee-Toggenburg-Zurichsee. Denkschrift uber die Eisenbahnverbindung Romanshorn-St-Gallen-Wattwil-Uznach*, p. Zollikofer-St-Gallen, 1911.

Art. 3. — Travail permis dans une grande voûte en moellons bien équarris et mortier de ciment. — On trouve partout des pierres s'écrasant au-dessus de 400^k, c'est-à-dire pouvant impunément travailler à 100^k par $\overline{0^m01^2}$, charge qu'on n'atteint pas.

C'est alors le mortier qui détermine l'effort permis.

En briquettes, un mortier plastique à 600^k de bon ciment à prise lente par m. c. de sable, porte plus de 200^k à 1 mois, plus de 300^k à 3 mois.

En joints de 10 à 15^{mm}, ce même mortier, bien fait au manège, bien serré au maillet, travaillera impunément à 60^k à 1 mois, à 90^k à 3 mois.

Le mortier empêche d'utiliser toute la résistance de la pierre.

Ce sont donc les joints qu'il faut améliorer : on l'a essayé [129].

§ 4. — *RÉSISTANCE DES VOÛTES A LA TRACTION*

Le mortier adhère aux maçonneries ; c'est par cette adhérence, qui croît avec le temps, que les maçonneries résistent à la traction : si la voûte est mal faite, les matériaux sales, il n'y en a plus.

Dans les très grandes voûtes, les très surbaissées, sous les positions les plus défavorables de la surcharge, aux grands abaissements de température, les calculs indiquent presque toujours des tensions, c'est-à-dire des tendances à fissures. A 1^k, 2^k, il n'y a pas de fissure [130], mais il est prudent de tracer les voûtes pour que la courbe de pression ne sorte jamais du noyau central.

On emploiera le meilleur ciment, celui qui adhère le plus [131].

Le béton de ciment, bien fait, résiste mieux à la traction que la maçonnerie appareillée.

129. — M. Tavernier a construit, en 1906, à la gare d'eau Branla, près de Lyon, un pont à deux arcs jumeaux en pierre de taille, à 3 articulations, de 25^m à $1/10^e$, à joints en zinc coulé.

La résistance du joint en zinc a augmenté avec celle de la pierre.

Annales des Ponts et Chaussées, 1907, volume V, septembre et octobre, p. 6 : « *Pont à arcs de pierre de taille articulés à la clef et aux naissances, avec joints coulés en zinc* ». M. Henri Tavernier, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

130. — Expériences autrichiennes (III, p. 376, art. 4).

131. — Le ciment happe fortement à la meulière de Paris, qui est trouée, rugueuse.

TITRE II

VOÛTES EN BÉTON

§ 1. — *CE QU'ON A FAIT EN BÉTON*

On a fait [1] en béton :

sous route, des buses [2], des passages par-dessus [3, 4], des ponts [5] ;

sous chemin de fer, — lignes d'intérêt local [6] et grandes lignes [7, 8], — des buses [2], de petits ouvrages [8], des moyens [7], des grands [7] ;

des souterrains [9, 10].

1. — Dans leurs aqueducs, leurs thermes, les Romains ont souvent fait le corps des voûtes comme celui des gros murs, par assises horizontales de cailloux et de mortier : ce sont les matériaux du béton, ce n'est pas du béton.

Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », Tome I, p. 521 à 523.

2. — Appendice.

3. — La Cie d'Orléans a construit, de 1873 à 1879, quantité de passages supérieurs en béton soit de chaux, soit de chaux et de ciment, jusqu'à 28m de portée (Brive à Limoges, 1873-1875 ; Nantes à Châteaubriant, 1875-1878 ; Bergerac au Buisson, 1877-1879,...)

4. — De 1893 à 1901, la Direction des Chemins de fer bavarois a construit 110 passages supérieurs en anse de panier, en béton, de 0m45 d'épaisseur à la clef, soit de 15m10 de portée avec tympans pleins, soit de 13m70 avec tympans traversés par deux voûtes de 5m.

Nouvelles Annales de la Construction, juin 1901, p. 88, Pl. 23, 24. « *Cintres métalliques mobiles employés en Bavière* ». René Philippe, Ingénieur des Ponts-et-Chaussées.

5. — § 2. Art. 1-*A*, Art. 2-*A*, Art. 3-*A*.

6. — Sur le chemin de fer d'intérêt local de Nurtigen à Neuffen (Wurtemberg), tous les ponts voûtés sont construits en béton :

Le plus grand (portée = 19m60 ; surbaissement = 1/5,6) s'est bien comporté aux épreuves, sous une locomotive de 29T.

Zeitschrift des Œsterreichischen Ingenieur-und Architekten Vereines, 12 octobre 1900.

7. — § 2. Art. 1-*C*, Art. 2-*B*, Art. 3-*B*.

8. — Sur la ligne de Linarès à Almeria (Espagne), quand on n'avait ni maçons, ni carrière, on a construit en béton (ciment : 450k, pierre cassée et gravier 2v, sable 1v - et souvent, à la place, 3v du tout venant du lit des torrents sans criblage), quantité d'ouvrages courants jusqu'à 5m, - souvent sous charge de remblai de 3 à 4m.

9. — Souterrains :

	Pierre cassée ou gravier	Mortier		
		Cube	Dosage	
			Sable	ciment à prise lente
Métropolitain de Paris (pieds-droits et radier)	0mc8	0mc55	1mc	450k (laitier)
Mont d'Or (Frasne à Vallorbe, 1910-1913) reins et pieds-droits				
partie courante dans la marne bleue	1mc	0mc50	0mc90	500k (Vicat)
là où il y avait des suintements d'eau gypseuse	1mc	0mc50	0mc90	600k (Pelloux)
là où il fallait un revêtement imperméable (béton à petits éléments)	0mc8 ("gravillon")		0mc4 (sable fin)	500k
Mauvages (Canal de la Marne au Rhin) (4880m dans une marne bleue se délitant à l'air, - en reconstruction depuis 1910 ; — cerveau de 3m90 de rayon ; revêtement de 0m80	1mc (gravier)	0mc60	1mc	500k (laitier)
Col de Tende (1 voie, - Ligne de Nice à Coni)	0mc8 (calcaire cassé)		0mc480 (quartzite)	250k
Col de Puymorens (traversée des Pyrénées, ligne d'Ax à Bourg-Madame).	1mc (pierre cassée à 0m06)	0mc67	0mc80	500k
New-York Central. Suivant le terrain	1vol 1vol		2vol 3vol	4vol 6vol

10. — Et aussi des écluses :

Ecluses du Canal de Panama, environ 3,5 millions de m. c. de béton à 1v, 3v, 6v. — Effort maximum : 21k par $\overline{0^m01}^2$.

Annales des Ponts-et-Chaussées, 1912, mars et avril : « *Le Canal de Panama* », M. Dumas.

Ecluse à la mer, de Emden (Deutsche Bauzeitung, 12 à 23 juillet 1913).

Des formes de radoub : cale sèche Gladstone à Liverpool (Génie Civil, 16 août 1913) ;

Des murs de soutènement.....

Pont	Pays	Date	Voir Tome, page	Voûtes: Nombre	Intrados [11]	Portée	Surbaissement	Béton: Composition en volume: Ciment 1vol — Sable	Pierre cassée ou Gravier	Résistance en Kg 0m01²: ℜ	à	Pressions en kg 0m01²: Clef max.	Clef moy.	Reins max.	Reins moy.	Rapport: Pression max. dans la voûte / ℜ	Observations — Sources
Art. 1. — Voûtes inarticulées [12]																	
A. – Sous route.																	
de Kinclaven, sur la Tay	Angleterre	1905	»	6	OE	18m75	1 4.56	1er roul. 3v, 2e roul. 8v									*Engineering*, 12 mai
sur le Piney Creek, à Washington	États-Unis	1907	»	1	Â	38.10	1 3.20	2v5	5v p.c.								*Engineering Record*, 26 janvier 1907, p
de l'Avenue Edmondson, à Baltimore	États-Unis	1908-09	I-122	1	E	42.37	1 3.17	2.5	5 p.c.			»	»	»	»		
de Bellefield, à Pittsburg [13]	États-Unis	1895-97	III-49	1	Â	45.72	1 4.10	2	4.5 p.c.			»	»	»	»		
de l'Avenue du Connecticut [14], à Washington	États-Unis	1904-08	I-67	5	C	45.72	»	2	4.5 p.c.			»	»	»	»		
sur la Moselle à Mehring	Allemagne	1903-04	III 252	4		46	1 7.45	3	5			»	21k3	31k5	18k6		
Schweich	Allemagne	1905-06	III 268	3		46	1 7.45	2.5	5			33k8	21.1	32.8	19.3		
Trittenheim	Allemagne	1907-08	III 276	3 / 1	Ā	46 / 30	1 7.45 / 1 6.71	2.5	5			»	22.5	29.2	21.6		
Longuich	Allemagne	1909-11	III 279	1 / 2 / 1		46 / 43 / 34	1 7.45 / 1 8.05 / 1 10	8	gr.			»	»	»	»		
de Guggersbach	Suisse	1905	III-59	1	Â	50.20	1 6.11	Pour 1m³ de béton 250k de ciment				22		22.5			
de Walnut-Lane	États-Unis	1906-08	II 83	2	ÂÂ	70.71	1 3.32	2	5 p.c.	331k	1 an	Pression maxima : 26k6				1 12	Gros moellons m… suivant le rayon.
sur la Rocky River	États-Unis	1908-10	II 95	2	ÂÂ	85.34	1 3.46	2	4 p.c.	145k / 223k	30 j. / 6 mois	44.1	37.1	39.8	32.3	1 5.6	Gros moellons m… suivant le rayon.
B. – Sous conduite d'eau.																	
sur la Sosa (Canal d'Aragon)	Espagne	1904	»	5	E	15	1 3	Ciment 225k Sable 500l	Gr. 880l	140k	28 j.	Pression maxima : 14k				1 10	*Revista de Obras Pu…* 27 octobre 1904.
de Pont-sur-Yonne	France	1870-73	I-213	1 / 3 / 2	E / E / E / E	40 / 30 / 22.60	1 5	chaux 0m³250 ciment 0m³125				»	»	»	»		
de Weisenbach	Allemagne	1885	III-219	1	Ā	40	1 8	2.5	5			20		25			
C. – Sous chemin de fer à voie normale.																	
de Cheltenham, sur la Rivière des Pères (Ch. de fer St-Louis San Francisco)	États-Unis		»	4	C	9.52	»	6									*Engineering News*, 1904. — Moins cl… qu'en béton armé
de Cannington [14]	Angleterre		»	10	E	15.24		6									Id., 2 nov. 1905.
de Glenfinnan (West Highland Ry)	États-Unis	1897-98	»	21	C	15.24	»	4 sable et pierre sortant du concasseur									*Minutes of Proceed. the Am. Soc. C.E* p. 304.
de Northampton (New Jersey) (Central Railroad — 3 voies)	États-Unis		»	1 / 1		15.78 / 10.36											Pont biais — 1;61m en 3 mois 1 2.
de Lindenwood, sur la Rivière des Pères (Ch. de fer St-Louis-San Francisco)	États-Unis		»	3	C	16.33	»										*Engineering News*, 1904. — Moins c… qu'en béton armé
de Lauscha (Viaduc: haut. 40m)	Allemagne	1912	»	6	C	20	»	2	4 p.c.	225k		Pression maxima : 16k					*Beton und Eisen*, … vier 1913.
de Galveston (une chaussée et 3 voies)	États-Unis	»	»	28	A	21											*Engineering Record* 27 mai 1914.
sous la gare de Rangier	Allemagne	1906-08	»	1	E	21.06											Dr von Emperger. …buch fur Eisenbet… Vol VI, p. 339.
d'Ashtabula (Ohio) (Lake Shore Ry — 4 voies)	États-Unis	1904	»	2	C	22.56	»										*Railroad Gazette*, … vier 1905.
de Berne (Ch. de fer de Gurbethal)	Suisse	1901	»	1	Â	23.40	1 3.9										Coût 15250f - En fer… *Schweizerische Bau…* 14 déc. 1901.
sur le Deep Creek, près de Degilbo	Angleterre	1905	»	1	Â	24.38	1 2.85	3	6 p.c.	180k	3 mois						*Engineering*, 27 jui… Moins cher qu'en… armé.
de Bellefield Avenue, à Philadelphie	États-Unis	1909-10	»	1	Â	24.38	1 4.72	»	»								*Engineering Record* 20 août 1910.
de Riverside (Californie) (Los Angeles and Salt Lake Ry)	États-Unis	1902-03	»	8	C	26.21	»	2	4.5 p.c.								*Engineering Record* 9 septembre 190…
de Borrodale (West Highland Ry)	États-Unis	1897-98	»	1	Â	38.73	1 5.54	4 sable et pierre sortant du concasseur									*Minutes of Proceed. the Am. Soc. C.E* p. 304.
sur la Big Muddy River	États-Unis	1901-03	I-225	3	E	42.67	1 4.67	2	5			47.7	23.9	13	10.3		

Art. 2. — Voûtes semi-articulées.

Pont	Pays	Date	Voir Tome, page	Nombre	Portée totale	Portée entre rotules	Surbaissement	Sable	Pierre cassée ou Gravier	ℜ	à	Clef max.	Clef moy.	Reins max.	Reins moy.	Rapport	Observations — Sources
A. – Sous route.																	
d'Ehingen, sur le Danube	Allemagne	1897-98	IX 260	2 / 1	21 / 20			2.5	5								… 1 8 de pierres.
d'Ehingen (Passage supér')	Allemagne	1891	IX 260	1	23	18	1 5	2	6			9k2		14k6			
de Rechtenstein	Allemagne	1892	IX 260	2	23	23	1 9.2					17		18			
de Mühlheim	Allemagne	1895	IX 260	»	29.20	22	1 10	2.5	5								
sur le Lein	Allemagne	1895	IX 260		29.60	23.10	1 6.6	2.5	5								
de Gemmrigheim	Allemagne	1895-96	IX 260	4	38	38	1 6.9					Pression maxima : 36k					
de la Coulouvrenière	Suisse	1895-96	IX 81	2	40	40	1 7.41	Pour 1m³ de béton Ciment 425k Sable 5 = Gravier 8		295k	28 j.	30	»	»	»	1 9.8	
de Munderkingen	Allemagne	1893	IX 55	1	59	50	1 10	2.5	5 gr.	254k	28 j.	35.3	»	39.2	»	1 6.6	
B. – Sous chemin de fer à voie normale.																	
sur la Cesena	Italie	1910-12	IX-264	3	30	30	1 8.82	Ciment …k Sable … 5	gr. … 8	230k	28 j.						

11. — Pour le s… de… Préliminaire, p. 3. 12. Voir aussi, Tome III, p. 83 et suivantes. 13. — Bandeaux et douelle en pierre de taille. 14. Bandeaux en béton …

Pont	Pays	Date	Voir Tome IV, page	Nombre	Portée entre appuis	Voûtes — Entre rotules — Portée	Entre rotules — Surbaissement	Béton — Composition en volume : Ciment 1vol — Sable	Pierre cassée ou Gravier	Résistance en Kg 0m01² — R	à	Pressions en kg 0m01² — Clef — MAX.	Clef — moy.	Reins — MAX.	Reins — moy.	Rapport : Pression MAX. dans la voûte — R	Observations — Sources
Art. 3. — Voûtes articulées.																	
A. — Sous route.																	
wasser, à Neubourg	Allemagne	1907-08	261	3	23m72	22m	1/8.3 et 1/9.3	»	»								D^r von Emperger. Handbuch fur Eisenbetonbau, Vol. VI, p. 340.
Hillesheim	Allemagne	»	»	1	24.60	»	»										
Halden	Allemagne	1904	261, 266	1 2	» »	25 18.50	1/9.09 1/10	4	6	172k	28 j.	Pression maxim. 25k6 24k2					
Hagen	Allemagne	»	»	1	25.50	»	1/7.28	»	»								Id., p. 341.
torf, sur la Sieg	Allemagne	1907	»	1 2	28 25	» »	1/9.3 »	» »	» »								Id., p. 340.
Brookside Park, à Cleveland	États-Unis	1906	269	1	28.04	26.33	1/16.5	2.5	5								
Ulm et Neu-Ulm	Allemagne	1911-12	261	1 2	» »	28.50 27	1/7.05 1/7.5										
nau	Allemagne	1896	266	1	»	30	1/10	2.5	5			Pression maxima : 35k					
arvis, sur la Schlitza (2 ponts)	Autriche	1902	264	1	30	30.40	1/9.8	2	3								
rst, sur l'Etsch	Autriche	1903	264	1	30	30.40	1/9.8	2.5	4								
Dusseldorf	Allemagne	1902	266	1	30.13	28.02	1/14.6	4	4	278k	6 mois						
lauconcourt	Allemagne	»	266	5	33	33	1/7.67	3	4.5								
Burzweiler	Alsace	1897	269	1	34.20	34	1/8.39	3	4.5								
Port-...-Bouc, Passages supérieurs	France	1912-13	»	1	25.60	25.60	1/6.56	Ciment 750k, sable 1mc	pierre cassée 2mc	»	»	Pression maxima : 35k					
Martigues, Miramas l'Estaque	France	1913-14	»	1	36.30	36.30	1/9.2	Ciment 750k, sable 1mc	pierre cassée 2mc	»	»	Pression maxima : 38k2					
ouvage	Allemagne	1906-07	266	1 2 1	36 34 30	36 34 30	1/7.04 1/7.5, 1/8.3 1/7.75	2.5	5			Pression maxima : 28k6					
tafel, sur la Lahn	Allemagne	1904	»	1	37.10	»	1/6.4	»	»								D^r von Emperger. Handbuch fur Eisenbetonbau, Vol. VI, p. 662.
Dennhausen	Allemagne	1909-10	266	3	38	36	1/8.9 1/9.4	3.5	3.5								
le Stvanice, sur la Moldau à Prague	Bohême	1911	»	1 2	39 36	» »	1/5.86 1/5.52		4 p.c.	606k	28 j.						Génie Civil, 5 oct. 1912.
Britz, sur le Canal de Teltow, près de Berlin	Allemagne	1904-05	266	1	39	36.42	1/7.5	5 4	6.5 4								Biais à 69°.
Stauffacher, à Zurich	Suisse	1899	»	1	39	39.60	1/10.7	»	»								
Frédéric-Auguste, à Dresde	Allemagne	1907-10	266	2 4	39.30 36.15 à 28.33	34.10 »	1/6.9	» »	» »								
Tubingen	Allemagne	1901	»	1 1	39.40 36.23	»	1/11.2 1/12.1	»	»								L^r von Emperger. Handbuch fur Eisenbetonbau, Vol. VI, p. 662.
Hochberg	Allemagne	1901-03	177	2	39.40	40	1/7.41	2.5	5 p.c.			28		34			
Grasdorf	Allemagne	1899-1900	129	1	40	40.39	1/8.93	2.5	4 p.c.	228k	96 j.	Pression maxima : 37k				1/6	
Halling	Allemagne	1899-1901	175	3	40	40.50	1/8.56	3	6 p.c.			»	»	»	»		
Neckargartach	Allemagne	1903-05	186	5	40	40	1/8 à 1/10	2.5	4.5			Pression maxima : 38k					Gravier 1k5, Pierre cassée 3k : 4k5
Reichenbach [15]	Allemagne	1902-03	183	1 1	44 28	41	1/10	2.5	5 gr.			27	»	26	»		
Wittelsbach [15]	Allemagne	1904-05	199	1 1	27 26			2.5	5 gr.			29	27	28	26		Arche de 44m de Wittelsbach.
Moulins-lez-Metz [15]	Allemagne	1904-05	202	1 2	44 40	44.70 40.54	1/7.75 1/8.37	2.5	5 gr.			25 24		31 32	15 18		
[illegible] [1]	Allemagne	1905-07	151	1	47.50	43.50	1/9.89	2.3	4.7			27	»	35.7	»		
ngkofen	Allemagne	1895	225	1	47.90	43	1/9.81	2.5	4.5	181k	160 j.	43.9		37.7		1/5	Gravier 4k, Pierre cassée 0k5 : 4k5
Graveneck	Allemagne	1911-12	213	1	48	48.42	1/6.25	2	5 p.c.			23.2		33.6			
Neckarhausen	Allemagne	1899-1900	232	1	59.40	50	1/11	2.5	5 p.c.			Pression maxima : 39k8					
Mannheim [15]	Allemagne	1905-08	205	2	59.50	58.50	1/10.6	4	3 p.c.			37	27	35	31		
Wallstrasse, à Ulm	Allemagne	1904-05	143	1	65.45	57	1/9.83	3	5 p.c.	346k	57 j.	Pression maxima : 40k				1/8.6	
B. — Sous chemin de fer à voie normale [16].																	
Rothenburg	Allemagne	1907	266	5	30	30.50	1/7.26	5									
Dresde	Allemagne	1894-96	266	5	31.35	»	»	5 5	6.75 5								
nnitz	Allemagne	1898-1900	107	1 4 6	43.10 27.90 26.65	» » »	» » »	4 5	4.5 p.c. 6.5	253k 208k	3 mois	Pression maxim. admise 28k5 25k					
hing	Allemagne	1905-08	95	1 1 1	44.35 33.95 33.89	38.55	1/3.32 1/2.58 1/2.65			305k	69 j.	Pression maxima : 26k				1/11.7	Gravier [illegible] Pierre cassée [illegible]
beuren	Allemagne	1903-04	159	1	59	57.16	1/5.82	2.5	5 p.c.	240k	28 j.	Pression maxima : 31k				1/7.7	
pten (3 ponts)	Allemagne	1905	115	1 2 6 2	64.50 63.80 21.60 20.60	50.60	1/5.52	2.5	5 p.c.	291k	28 j.	Pression maxima : 35k				1/8.3	

15. — Bandeaux en pierre. 15bis. — Voir renvoi 59, p. 62. 16. — Voir aussi, Tome IV, p. 249 et suivantes.

Art. 1. — Éléments.

A. - Ciment. — On choisit pour les voûtes le meilleur ciment.

B. - Sable. — Sable naturel, - sable de pierres broyées [17, 18].

C. - Pierre cassée ou gravier. — On a employé le plus souvent de la pierre cassée ; on l'a parfois mélangée de gravier [19].

D. - Matériaux lavés. — En général, on lave les matériaux [20].

Art. 2. — Dosage [21]. — En Allemagne, aux États-Unis, où l'on a fait beaucoup de voûtes en béton, les dosages les plus employés sont :

		Ciment	Sable	Pierre cassée, ou Gravier, ou mélange des deux
Voûtes	Volumes..................	1	2.5	5
	soit, pour 1mc de sable.......	0mc4	»	2mc
Culées	Volumes..................	1	3	6
	soit, pour 1mc de sable.......	0mc33	»	2mc

Certains cahiers des charges imposent seulement la résistance que doit avoir le béton, à charge pour l'entrepreneur de trouver le dosage.

Art. 3. — Pierres dans le béton. — Pour diminuer le cube du béton, peut-être pour en augmenter la résistance, on y a noyé de grosses pierres :

en fondation [22] ;

dans de grandes voûtes [23].

On y emploie le béton comme du mortier entre de grosses pierres plates posées dans le sens du rayon [24].

§ 4. — *EFFORTS. — RÉSISTANCE IMPOSÉE*

Dans les grandes voûtes, on fait travailler couramment le béton de 30k à 40k [25, 26].

17. — Neckarhausen (IV, p. 232). Voir les essais de M. von Bach à Stuttgart, p. 235. — Wallstrasse (IV, p. 143), mortier de parement.

18. — Voir p. 12, Art. 1.

19. — Voir tableau p. 25, dernière colonne.

20. — Aux essais faits pour le pont de Neckarhausen (IV, p. 232), les matériaux lavés et non lavés ont donné les mêmes résistances.

21. — Sur la ligne de Miramas à L'Estaque, on a construit, en 1911-14 deux passages supérieurs en béton, articulés, de 25m60 (Φ_{11}, p. 62) et 36m30 de portée, au dosage : ciment 750k, sable 1mc, pierre cassée 2mc.

22. — Höfen (IV, p. 41), Marbach (IV, p. 45), Inzigkofen (IV, p. 225), Moulins-lez-Metz (IV, p. 202), Edmondson (I, p. 122), Walnut Lane (II, p. 83), Rocky River (II, p. 95).

23. — Walnut Lane (II, p. 83), Rocky River (II, p. 95).

24. — On a construit en béton de ciment et gros blocs noyés les barrages de :

Barossa, près de la ville de Gower (Australie), 29m de hauteur. (Engineering News, 7 avril 1904, p. 321) ;

la Shoshone River (Montagnes Rocheuses, - Etat de Wyoming), hauteur 100m au-dessus de la fondation, 75m au-dessus du lit, — béton à 1c, 2s, 5p, avec 25 environ de blocs de 10 à 100k, 0m15 au moins de béton entre eux (Engineering Record, 23 juillet 1910, p. 88).

25. — Voir § 2.

26. — Une voûte d'épreuve faite en Wurtemberg a donné, au bout de 2 ans et 8 mois, une résistance de 520k par 0^m01^2.

Centralblatt der Bauverwaltung, 26 oct. 1901.

§ 5. — *MODE D'EXÉCUTION DES GRANDES VOÛTES EN BÉTON*

Art. 1. — Béton damé. — Sauf les premières (celles de Pont-sur-Yonne[27], qu'on reconstruisit trois fois), toutes les grandes voûtes en béton sont construites par tranches entre cloisons normales à l'intrados ou plutôt à la fibre moyenne, et sur toute l'épaisseur à la fois[28]. Dans chaque tranche, le béton est pilonné par couches horizontales.

On maintient humide la surface du béton posé le soir : au besoin, on la nettoie et on y applique du mortier.

Pour avoir encore une meilleure liaison, on y ménage quelquefois des rainures[29].

Art. 2. — Béton moulé. — On a parfois employé des voussoirs de béton moulé d'avance (pierre de taille artificielle)[30] :

soit pour la douelle et le quentage[31] ;
soit pour la douelle seulement[31 bis] ;
soit pour les bandeaux seulement[32].

Art. 3. — Voûte partie en béton, partie en pierre de taille. — On fait, quelquefois, le corps seulement en béton et les bandeaux en pierre de taille[33] ; ou les bandeaux et la douelle en pierre de taille, le reste en béton[34].

Art. 4. — Parements. — On a renoncé aux enduits ; ils adhèrent mal. On fait les parements en même temps que le corps, mais en béton plus fin, qu'on dresse ensuite au ciseau ou qu'on lave quelquefois à l'acide chlorhydrique pour lui donner l'aspect de la pierre[35].

On a employé des ciments colorés[35, 36], des sables de couleur[37].

Art. 5. — Protection contre la gelée. — Quand il a fallu bétonner par le froid, on a ajouté à l'eau du mortier, du sel dénaturé[38], du carbonate de soude[39].

27. — I, p. 213.

28. — Sauf les voûtes de Guggersbach (III, p. 59) et de Kinclaven (V, p. 24), construites en deux rouleaux.

29. — Big Muddy (I, p. 225), — Avenue du Connecticut (I, p. 67).

30. — On a revêtu sur 0^m25 la calotte du souterrain de Montrichard (Ligne de Vierzon à Tours) en briques de béton de ciment comprimé (300^k de ciment de Portland par m. c. de sable à gros grains).

Au souterrain de Puech Mergou (ligne d'Albi à Saint-Affrique), 960^m de longueur, sur 920^m dans le schiste compact, on a revêtu la calotte, sur 0^m25, en briques de ciment : ciment 300^k, gravillon 1^{mc}.

Dans son Rapport sur les souterrains des Alpes, au Congrès de Berne en 1910, M. Hennings conseille l'emploi des voussoirs en béton, même pour les fortes pressions : alors, les armer.

Au deuxième souterrain du Simplon, on emploie des pierres artificielles de $35^c \times 17^c \times 7^c4$ ainsi composées : 5 % de ciment Portland, 15 % de chaux, 85 % de sable siliceux. On les chauffe sous pression de 6^{at} ; elles portent 400 à 600^k par $\overline{0^m01}^2$.

Au souterrain de Puymorens (traversée des Pyrénées, ligne d'Ax à Bourg-Madame), on a prévu ce dosage : ciment à prise lente, 300^k ; sable, 400 litres ; pierre cassée à l'anneau de 0^m04, 800 litres.

31. — Wiesen (I, p. 235). 31bis. — Viaduc des Torrents, à Finhaut (Ligne de Martigny au Chatelard), Portée 35^m40, Surbaissement 1 3.64. Ciment Portland, 400^k ; sable 450^l ; pierre cassée à 0^m04, 900^l.

32. — Avenue du Connecticut (I, p. 67), — Cannington (§ 2, Art. 1, C_1).

33. — Reichenbach (IV, p. 183), Wittelsbach (IV, p. 199), Moulins-lez-Metz (IV, p. 202), Mannheim (IV, p. 206), Elise (IV, p. 151).

34. — Bellefield (III, p. 49). 35. — Grasdorf (IV, p. 129). 36. — Munderkingen (IV, p. 55), Inzigkofen (IV, p. 225). 37. — Wallstrasse (IV, p. 143).

38. — A 7 pas d'accident par - 14° (Œsterreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 1er novembre 1902, p. 777. « *Über Betonbauten auf der Salzkammergutbahn* », M. Karl Muck, Ingénieur.

On a proposé aussi le chlorure de calcium qui abaisse davantage le point de congélation et rendrait le mortier plus étanche.

39. — Voir, pour l'emploi du carbonate, p. 14. Art. 7-A.

Art. 1. — Avantages. — Le béton est économique, lorsqu'on a, à proximité, du ciment, du sable, du gravier [40, 41] ; ou quand il est difficile de trouver des moellons [42] ou des maçons.

Il dispense des sujétions d'appareil dans les ponts biais [43].

Il est fait par des machines, et est vite fait.

Chaque jour, les bons maçons se font plus rares ; malgré qu'on en ait, on construit de plus en plus en béton, que mettent en place de simples manœuvres [44, 45], bientôt des machines [46]. Aussi, l'emploie-t-on beaucoup aux États-Unis [47].

Il est moins lourd que la maçonnerie et pèse moins sur le sol [48].

Art. 2. — Inconvénients.

A. - Perméabilité. — Si l'eau traverse une voûte appareillée, elle n'y peut appauvrir en mortier que les joints : il n'y a du mortier que là.

Si elle traverse le béton, où le mortier est partout, elle attaque tout.

On devra donc, encore plus que pour les voûtes en moellons, mettre à l'abri de l'eau les voûtes en béton.

Le béton est très perméable [49]. On a fait beaucoup d'essais pour le rendre étanche : on n'y a pas encore réussi [50].

Le mieux est de forcer le dosage et de n'y mettre que de petites pierres. Le béton riche et à petits éléments se laisse moins traverser.

B. - Fissures. — Il faut au béton des formes pleines, arrondies [51] : pas de rentrants, pas de changements brusques de formes.

S'il y en a, comme aux retombées des arcs très surbaissés, il faut l'articuler. Autrement, il y aura, non pas des ouvertures localisées de joints comme dans les voûtes appareillées, mais des fissures irrégulières, irréparables.

C. - Vilain aspect. — Jusqu'ici, il demeure désagréable d'aspect : grandes surfaces ennuyeuses, tachées. On ne sait encore qu'y dessiner des moulures, de faux joints.

40. — Munderkingen (IV, p. 55), Inzigkofen (IV, p. 225), Grasdorf (IV, p. 129), Illerbeuren (IV, p. 159).

41. — On se contente parfois de mélanger le ciment à ce qui sort du concasseur : le fin est le sable (Ponts de Glenfinnan, 21m, Borrodale, 38m73, — § 2, Art. 1-C_1).

42. — Wiesen (I, p. 235).

43. — Munderkingen (IV, p. 55), Élise (IV, p. 151), Pont-sur-Yonne (I, p. 213), Ponts de l'Ile Stvanice à Prague, de Britz, près de Berlin (p. 25),.....

44. — Big Muddy (I, p. 225).

45. — On le préfère pour remplir les chambres de travail à l'air comprimé, où les maçons ne travaillent pas volontiers.

46. — On commence à le pilonner mécaniquement.

47. — On y voit concasser de beau granit pour faire des pierres en béton moulé.

48. — Dans les culées qui résistent par leur poids, il faut de plus grandes épaisseurs.

49. — Le capitaine américain Taylor a constaté des suintements à travers plus de 9m de béton. (Revue du Génie, juillet 1903).

50. — On a enduit la surface d'huile. On a mélangé, au moment du gâchage, du pétrole, du savon noir ...

Jusqu'ici, les bétons imperméabilisés ne résistent qu'aux faibles pressions d'eau. Sous les fortes, ils sont plus perméables que d'autres. Le mieux paraît être de forcer le dosage et de badigeonner de goudron.

Au Canal de la Marne à la Saône, le béton de gravier, avec des grains de 0m02 au plus, bien comprimé, a été « remarquablement étanche ».

Génie Civil, 10 octobre 1908, p. 396 à 400. « *Le Canal de la Marne à la Saone* ». M. Jacquinot, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

51. — Il est très bien employé dans un phare (Phare de Raz-Tina, Tunisie).

Annales des Ponts et Chaussées, 1897, 1er trimestre, p. 252, M. Regnoul.

TITRE III

FRUIT DES TÊTES

§ 1. — *CE QUI A ÉTÉ FAIT*

Art. 1. — Petits ouvrages. — Pas de fruit[1].

Art. 2. — Viaducs. — Voir à l'Appendice.

Art. 3. — Ponts bas à voûtes de moins de 40m. — Presque tous ont des tympans verticaux.

Art. 4. — Voûtes de 40m et plus. — Sur 153 ouvrages comportant des voûtes de 40m et plus, 101 n'ont pas de fruit, dont tous les ponts sous route inarticulés, à un seul anneau :

52 sont à fruit : les voici

Les voûtes articulées sont en italiques.

Fruits	Voie[2] portée	Ponts de :[2]
1/45=0,022	Fr	*Kempten*, $\widehat{A}^1$, IV, p. 115.
1/40=0,025	Pte	Luxembourg, Walnut-Lane, Rocky River, Constantine, $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$, II, p. 67, 83, 95, 107.
	Fr	Amidonniers $E^n E^n$, I, p. 193.
	Fr	Céret, Escot, $\widehat{A}^1$, II, p. 160 et 174 ; Krummenau $\widehat{A}^1$, III, p. 164 *(Bandeaux : 1/40, Tympans 1/50).*
	fr	Solis C^1, I, p. 55 ; Wiesen, E^1_h, I, p. 235 . Cinuskel, Tuoi, $\widehat{A}^1$, II, p. 189 et 194.
1/36=0,026	Fr	Ballochmyle C^1, I, p. 41.
1/33=0,030	Fr	Pouch, Freyssinet $\widehat{A}^1$, III, p. 110 et 112.
1/30=0,033	Fr	Castelet $\widehat{A}^1$, II, p. 130 ; Gutach, Schwändeholzdobel, Langenbrand, $\widehat{A}^1$, III, p. 122, 126 et 152 ; *Garching* E^n, IV, p. 95.
1/25=0,04	Fr	Lavaur, Antoinette, $\widehat{A}^1$, II, p. 135 et 145.
1/20=0,05	Pte	*Wallstrasse* $\overline{A}^1$, IV, p. 143.
	Fr	$\widehat{A}^1$, II : Wäldlitobel, p. 157 ; Palmgraben, p. 164 ; Schalchgraben, p. 168 ; Rothweinbach, p. 171.
		$\widehat{A}^1$, III : Maretta, Prarolo, p. 93 ; Gour-Noir, p. 103 ; Jaremcze, p. 114 ; Jamna, p. 118 ; Worochta, p. 120 ; Diveria, p. 130 ; Strandeelven, p. 132 ; Krenngraben, p. 134 ; Steyrling, p. 137 ; Salcano, p. 141 ; Svenkerud, p. 150 ; Boïlefos, p. 159.
		Canale $\widehat{A}^n$, III, p. 185 ; *Morbegno*, $\overline{A}^1$, IV, p. 65 ; *Illerbeuren*, $\overline{A}^1$, IV, p. 159.
1/10=0,10	Pte	*Hochberg*, *Neckargartach*, $\overline{A}^n$, IV, p. 177 et 186.
	Fr	Chemnitz $\widehat{A}^1$, III, p. 129.
Fruit courbe	Pte	$\overline{A}^1$, IV : *Inzigkofen*, p. 225 ; *Neckarhausen*, p. 232 ; *Max-Joseph*, p. 242.

La première grande voûte à fruit, celle de Ballochmyle[3], est de 1846.

1. — Appendice : Ouvrages de 8m et au-dessous.
2. — Pour le sens des abréviations, voir Préliminaires, p. 3.
3. — I, p. 41.

Le fruit augmente les sujétions d'appareil et la dépense, mais allonge les joints des reins et y réduit le travail.

Il augmente la résistance aux efforts transversaux (vent, force centrifuge).

Il est souvent utile, quelquefois nécessaire, dans les ponts en courbe [4].

Mais, surtout, il fait bien.

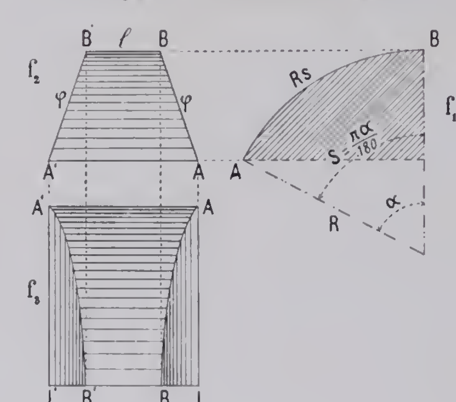
De plus, si on se place sous la voûte, près d'une retombée, l'effet des fruits s'ajoute à celui de la perspective : l'ouvrage paraît plus grand.

Au-dessus de piles à fruit, on se gardera de placer des tympans verticaux : ils paraîtraient en surplomb [4].

Il ne faut pas exagérer le fruit : 1/40 suffit [5].

4. — Appendice : Viaducs.

5. — Dans une voûte en arc de cercle de rayon R, en fruit φ, les courbes de tête d'intrados sont des arcs d'ellipse surhaussée de 1/2 axes R et $R\sqrt{1+\varphi^2}$.



Soient :

l la longueur de la génératrice de clef ;

α l'angle au centre de l'arc AB ;

s sa longueur sur la circonférence de rayon 1.

La surface de douelle D entre la clef et une retombée est :

$$D = Rs\,[l + 2\,R\,\varphi] - 2\,R^2\,\varphi\,\sin\alpha$$

Le volume du vide A B I A' B' I' (f_3) est :

$$V = R^2\left[s - \frac{\sin 2\alpha}{2}\right]\left(\frac{l}{2} + R\,\varphi\right) - \frac{2}{3}\,\varphi\,R^3\,\sin^3\alpha$$

TITRE IV

PILES

CHAPITRE I. — DIMENSIONS ET DISPOSITIONS

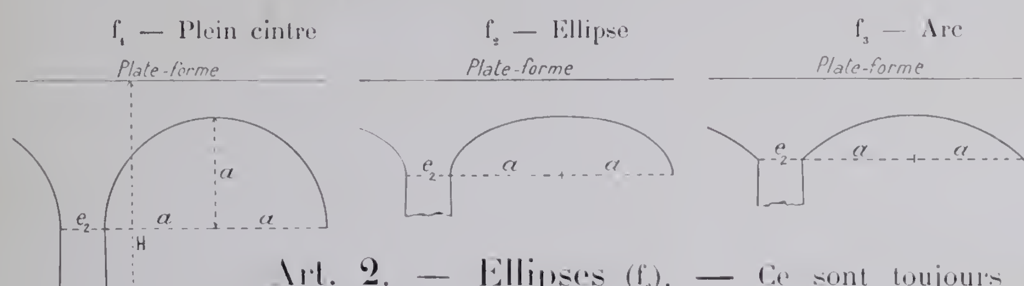
§ 1. — *ÉPAISSEUR DES PILES AUX NAISSANCES DES VOÛTES*

Art. 1. — Pleins cintres (f_1). — Pour un premier essai, — et même mieux, — on peut accepter la formule empirique :

$$e_2 = \frac{2a}{10} + 0,04\,H$$

quel que soit H, c'est-à-dire pour les pleins cintres bas[1], comme pour les très hauts viaducs[2].

Pour les ponts bas, $\frac{e_2}{2a}$ est au moins 1/8.



Art. 2. — Ellipses (f_2). — Ce sont toujours des ouvrages bas.

Pour les surbaissements usuels, 1/3 à 1/5, même entre deux arches un peu inégales, on peut encore accepter $\frac{e_2}{2a} = \frac{1}{8}$[3,4], et même moins, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{10}$[5].

Avant Perronet[6], on prenait $\frac{e_2}{2a} = 1/5$ et même plus[7] : à Neuilly, $\frac{e_2}{2a}$ est réduit à 1/9,2.

Art. 3. — Arcs (f_3). — Ce sont aussi des ouvrages bas.

On prend $\frac{e_2}{2a}$ de 1/8 à 1/10[8] pour des piles entre deux voûtes de portées et montées (et par conséquent de poussées) égales, — et même un peu différentes.

1. — Au pont de Nogent-sur-Marne (I, p. 79) : $e_2 = 6^m$; $2a = 50^m$; $H = 28^m$: $\frac{e_2}{2a} = 0,12$. La formule donne 0,1224.

Au pont de St Waast sur l'Agoût (ligne de Montauban à Castres) : $2a = H$; $e_2 = 3^m$; $2a = 20^m$; $\frac{e_2}{2a} = 0,15$. L'effet est bon. La formule donne 0,14.

2. — APPENDICE : Viaducs. — Pour $2a = 0,40\,H$, rapport conseillé, $e_2 = 0,2\,(2a)$ épaisseur courante aux naissances des piles à mortier de chaux.

3. — Pont au Change (1/4,5) ; ponts de Port-Ste Marie (1/3,2), Marmande (1/3,6), Saubusse (1/3),....

4. — Ponts : de l'Alma (arche centrale de 43m au 1/5 entre 2 de 38m50) (I, p. 153) ; des Amidonniers, entre l'arche de 46m et celles de 42m, — entre celles de 42m et de 38m50 (I, p. 193).

5. — Au pont de Verdun-sur-le-Doubs (I, p. 165), la pile a 4m entre 2 arches de 41m et 38m50.

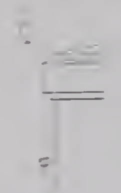
6. — Les Ingénieurs romains, ceux du Moyen âge, réglaient souvent les piles de façon à résister à la poussée d'une arche : on pouvait ainsi construire les voûtes l'une après l'autre.
Choisy. — *Histoire de l'Architecture*, I, p. 583, - II, p. 503.

7. — A la fin du XVIIIe siècle, Bélidor conseille pour les grandes voûtes : en plein cintre, le 1/6e ; en anse de panier, le 1/5e.
Architecture hydraulique, seconde partie, Tome II, p. 443, - Paris, Firmin-Didot, M.DCC.LXXXX.

8.

$\frac{e_2}{2a}$	Ponts	Dates	Portée $2a$	Surbaissement	$\frac{e_2}{2a}$	Ponts	Dates	Portée $2a$	Surbaissement
1/8.2	de la Rouvière, sur le Lot (*Mende-*	1878-82	21m	1/7.21	1/9.5	d'Iguerande, sur la Loire (Saône-	1895	28m60	1/7.62
1/8.1	de la Farelle, id. (*Séverac*)	1879-82	26	1/8.28	1/9.7	d'Arciat, sur la Saône (et-L^re)	1906	31	1/7.1
1/8.6	National, à Paris.	1852-53	34.50	1/7.5		Corneille, à Rouen.	1810-35	31	1/7.54
1/9	de St Loup, sur l'Allier (*La Ferté-Hauterive-Gannat*).	1910-13	33	1/7.5	1/10	Boucicaut (III, p. 243).	1888-90	40	1/8
					1/10.1	d'Austerlitz, à Paris.	1854	32.30	1/6.86
1/9.3	de Roanne, sur la Loire.	1858	28	1/8	1/11.8	d'Orléans (III, p. 255).	1901-06	13.85	1/7.56

§ 2. — *FRUIT TRANSVERSAL DES PILES*



Un parement vertical est sec et dur [9].

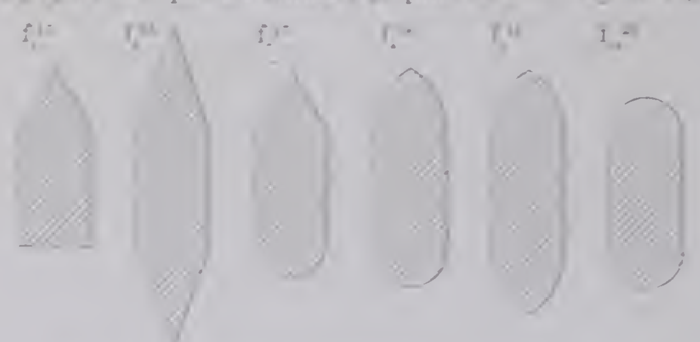
On donnera un fruit de 1/30 à 1/20, soit 3cm3 à 5cm [10].

Dans quelques ponts de ville, on a dressé en courbe les pieds-droits [11], soit pour continuer l'ellipse d'intrados [12], soit même sous des travées métalliques [13].

Les fruits courbes s'imposent pour les très hauts viaducs [14].

§ 3. — *BECS*

Art. 1. — Tracé en plan. — On a fait des avant-becs en pointe (f_1, f_2, f_3), en pointe effilée (f_2), plus tard en ogive (f_3, f_4), en demi-cercle (f_{10}) : des arrière-becs carrés (f_1), en pointe, en pointe effilée (f_2), en trapèze (f_3), en ogive (f_4), en demi-cercle (f_5, f_{10}).



Aujourd'hui, on fait trop de becs circulaires (f_{10}) : c'est monotone.

9. — Ponts romains de Salamanque, de Ségovie, d'Alcantara sur le Tage....

10. — 1/30 aux ponts de Montlouis, de Marmande, aux ponts sur la Seine de la ligne de Mantes à Argenteuil ; 1/20 aux ponts de Chalonnes, de St-Waast, 1/25 au pont d'Arcial (Saône-et-Loire).

11. — Pont de Digoin, sur la Loire (Saône-et-Loire).

12. — Ponts de Bercy, à Paris ; de l'Empereur-François (I, p. 168) ; Édouard VII (I, p. 182) ; des Amidonniers (I, p. 195).

13. — Pont du Métropolitain à Passy.

14. — Appendice. - Viaducs.

15. — Ponts romains : Rimini, Salamanque, Fabricius, Milvius, St-Ange ....
[illegible] (Xe siècle), Albi (XIe), St-Étienne, St-Martial à Limoges, Valentré à Cahors, Entraygues, Estaing (XIIIe), Ponte Vecchio (III, p. 173) (XIVe).

16. — [illegible] Avignon, La Guillotière à Lyon (XIIIe), Pont-St-Esprit (XIIIe), Montauban (XIVe), Toulouse, Trinité à Florence, Pont-Neuf à Paris (XVIe), Pont-Marie, Pont Royal (XVIIe).....

17. — Blois (1716-1724) (Φ_1), Joinville (Φ_2)....



Φ_1 — Pont de Blois — [illegible]



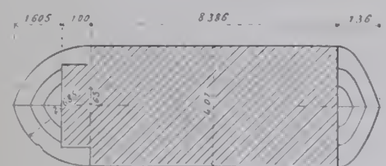
Φ_2 — Pont de Joinville — [illegible]

18. — Compiègne (1730), Port-de-Piles, sur la Creuse (1747) (Φ_3, Φ_4), Orléans (1751-60), Mantes (1757-65), Tours (1764-77)....

19. — Neuville, sur l'Ain (1770-74), Fouchard, sur le Thouet, à Saumur (1773-84), Mirepoix sur l'Hers (1773-92), Homps, sur l'Aude (1781-88).....

20. — Avant le XIXe siècle : [illegible], sur la Seille (1782-85), St-Dié, sur la Meurthe (1785-1821), Nemours, sur le Loing (1795-1804).

f_{11} — Pont de Saint-Loup [21]



L'arrière-bec ne compte pas pour l'écoulement des eaux.

On peut le supprimer et réduire le volume de la pile et de sa fondation : si l'aspect n'en souffre pas ; quand les fondations sont sur un sol peu affouillable.

Sans le supprimer complètement, on peut l'aplatir en triangle obtus à lignes droites [22], ou courbes [23,24] (f_{11}).

Pont de Port-de-Piles, sur la Creuse

Φ_3 — amont — septembre 1906



Φ_4 — aval — septembre 1906



Art. 2. — Hauteur.

— Si les naissances sont au-dessus de l'eau, on y arrête les becs ; sinon, on les élève au moins jusqu'à l'extrados des bandeaux.

S'il y a de la navigation, ils doivent dépasser les « hautes eaux navigables », pour que les bateaux les voient et que le courant les rejette sous l'arche.

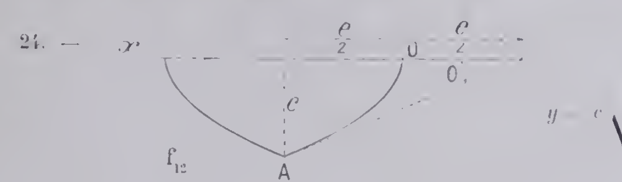
Les becs des ponts bas en plein cintre et en ellipse, qui s'élèvent au-dessus des naissances, sont comme rapportés, plaqués devant les ouvrages (Φ_3, Φ_4).

21. — sur l'Allier (La Ferte-Hauterive à Gannat), 1910-1913, 7 arcs de 33m à 1/7.5.

22. — Amidonniers (I, p. 193).

23. — Orléans (III, p. 257), Saint-Loup, (voir renvoi 21).

24. —



f_{12}

$y = e\sqrt{\frac{2x}{e}}$

Pont d'Entraygues (Aveyron), sur la Truyère (XIIIe siècle)

Φ_5 — amont — septembre 1907



Φ_6 — aval — septembre 1907

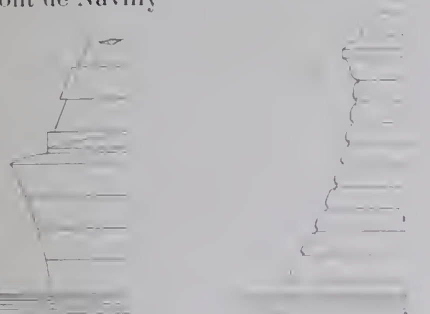


La fondation de la pile est mal utilisée si elle ne sert qu'à porter une estacade pour couper l'eau.

On peut élever le bec jusqu'à la voie et l'utiliser comme refuge. On a ainsi très heureusement prolongé des becs triangulaires ou carrés (Φ_5, Φ_6), — moins heureusement des becs ronds [25].

Art. 3. — Profil des avant-becs. — On donne en général aux becs le même fruit qu'aux pieds-droits.

f_{13} Pont de Navilly f_{14} — Pont des Amidonniers





Un courant qui heurte une surface verticale en affouille le pied.

Au pont de Navilly (1783-88), Gauthey a profilé l'avant-bec en proue de bateau [26], forme très propre à provoquer des affouillements [27] (f_{13}).

Au pont des Amidonniers, la courbe est concave, en forme d'éperon : elle s'est rencontrée bien tracée pour les prévenir [28] (f_{14}).

Φ_7 — Pont à Dresde — septembre 1906



A un pont de Dresde (Φ_7), les voûtes reposent sur des piles de couronnes qui sont comme gonflées sous leur poids.

Ceci n'a guère été imité, – heureusement.

Art. 4. — Chaperon. — Le fût des becs est coiffé d'un chaperon. On l'a souvent fait trop maigre : ceux des ponts de St Waast (f_{15}), de St Loup (f_{17}) font bon effet.

On lui donnera de fortes épaisseurs, de fortes saillies : on ne voit que sur les dessins les moulures fines.

25. — Pont sur la Bidassoa. — Pont de Mauzac (Ligne de Bergerac au Buisson).

26. — Annales des Ponts et Chaussées, 3e trimestre 1904, p. 5 à 130, Pl. 11 a 13. « *La vie et les travaux de Emiland Gauthey. — Le Pont de Navilly sur le Doubs* ». M. de Dartein.

M. de Dartein a reproduit ce mémoire dans son grand ouvrage . « *Etudes sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIXe siècle* », vol. IV — Paris, Béranger, 1909, p. 1 à 89, 173 à 189, PL. 23 a 30.

27. — « *On constata en septembre 1787 un affouillement de 11 à 12 pieds de profondeur devant le premier avant-bec et jusqu'au milieu de la longueur de la pile* ». Loc. cit. renvoi 26, — p. 129.

28. — I › I) :

Mais il ne faut pas exagérer[29] ↓ (Φ_8).

Φ_8 — Pont Cornélius, à Munich[30] — août 1908



Φ_9 — Pont de Reichenbach, à Munich[31] — août 1908

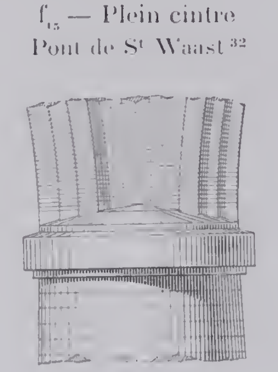


On a quelquefois supprimé le chaperon (Φ_9).

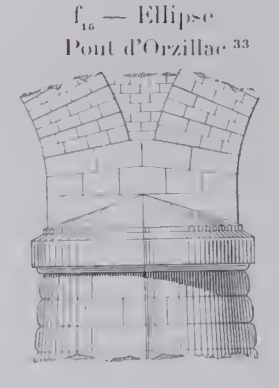
§ 4. — *RETOMBÉES DES BANDEAUX SUR LES BECS*

Art. 1. — Les naissances des voûtes sont plus hautes que les becs. — Pas de difficulté pour les pleins cintres (f_{15}), les ellipses (f_{16}), les arcs (f_{17}).

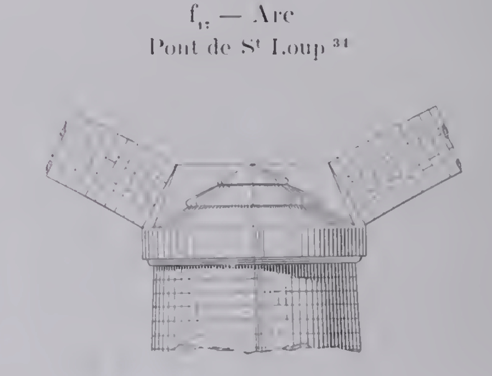
f_{15} — Plein cintre
Pont de St Waast[32]



f_{16} — Ellipse
Pont d'Orzillac[33]



f_{17} — Arc
Pont de St Loup[34]



En faisant porter la retombée sur la moulure[35], on réduit la portée des voûtes (f_{17}) ; les Egyptiens avaient ainsi diminué par la saillie des chapiteaux la portée des architraves[36].

29. — Pont de Garching (IV, — Φ_1, p. 95, Φ_2, p. 97). 30. — Voir IV - p. 180. 31. — Voir IV - p. 183.

32. — sur l'Agoût (Montauban à Castres) 1882-84, 5 arches en plein cintre, de 20^m.

33. — sur la Loire (Le Puy à Nieigles-Prades), 5 arches en ellipse, de 33^m (Projet).

34. — Voir renvoi 21.

35. — Ponts de Charrey, d'Orleans (III, p. 257, — 4 — renvoi 4), de Saint-Loup (f_{17}).

36. — La poussée de la voûte est oblique : la moulure porte peu. C'est ainsi qu'on a reçu sur un corbeau *c* (f_{18}) la retombée des nervures, à Sens, à Châlons (Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », II, p. 294, 295).

c

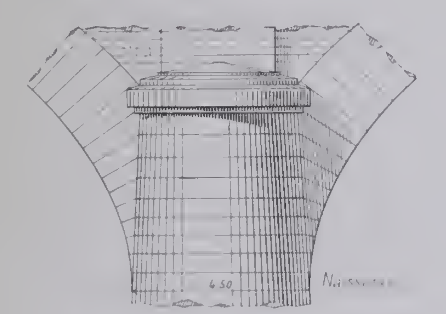
f_{18}

Art. 2. — Les naissances sont plus basses que les becs. — A. *Pont en plein cintre ou en ellipse.* — Les ponts en plein cintre quelquefois, les ponts en ellipse souvent, sont des ouvrages bas : les becs coupent alors les bandeaux (Φ_{10}).

Φ_{10} — Pont de Marmande [37] — septembre 1904



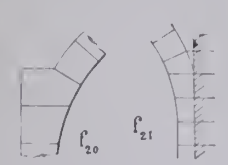
f_{19} — Pont de Marmande [37]



Il faut raccorder les assises de la pile, qui sont horizontales, à celles du bandeau, qui sont normales à l'intrados : on les « balance », de façon à n'avoir ni assises trop épaisses, ni voussoirs trop petits (f_{19}) : on n'y réussit pas toujours.

Il convient que le couronnement soit à la rencontre de l'extrados du bandeau et de l'arête de la pile [38], — non plus haut.

Au pont des Amidonniers, on a prolongé les assises de la pile jusqu'à l'intrados [39] ; les sommiers sont en porte-à-faux, « en tas de charge » [40].



37. — sur la Garonne (Marmande à Mont-de-Marsan), 1881-1885, 5 arches en ellipse de 36m à 1 3.6.

38. — On ne l'a pas fait, — à tort, — aux ponts de Moissac, (Φ_4, p. 93), de Bercy, au viaduc du Point-du-Jour

39. — I, p. 196ter, f_{10}.

40. — On a reçu ainsi des nervures (f_{20}, f_{21}) (Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », II, p. 273, 294).

B. Ponts en arc — Quelquefois, on a prolongé les fûts au-dessus des bandeaux. Ils sont alors coupés brutalement, sans raccordement d'appareil (Φ_{11}).

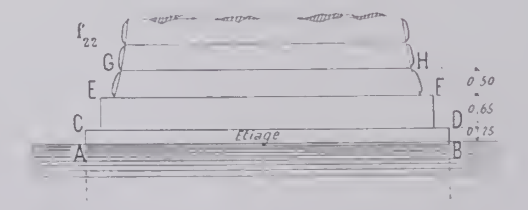
Φ_{11} — Pont « di Mezzo » sur l'Arno, à Pise — juin 1908



§ 5. — *NIVEAU DU SOCLE OU DU RESSAUT*

Il convient que le massif de fondation ne soit jamais découvert de plus de 40cm à 50cm et qu'on voie le socle la plus grande partie de l'année.

C'est d'après le graphique des hauteurs d'eau qu'on en fixe le niveau [41].



41. — Au pont des Amidonniers, l'eau est en moyenne par an :
4 jours au niveau AB ;
199 jours entre AB et CD.
10 jours entre CD et EF.
44 jours entre EF et GH.
18 jours au-dessus de GH.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX ET APPAREIL

§ 1. — *MASSIF DE FONDATION*

Art. 1. — Parement. — Dans les rivières qui charrient des graviers, des cailloux, on parementera le massif en moellons durs, bien assisés, avec peu de joints ; on ne le fera jamais en béton, en béton armé : dans la Durance, les hausses d'une fondation descendue à l'air comprimé ont disparu en quelques années.

Art. 2. — Noyau. — En maçonnerie ordinaire ; à défaut, en galets, en béton.

§ 2. — *AU-DESSUS DE L'EAU OU DU SOL*

Art. 1. — Socle. — Le socle est en libages ou en pierre de taille.

Art. 2. — Parement du fût. — Le parement est, suivant le lieu où le pont est bâti, — campagne ou ville, — suivant son caractère, en moellons équarris, en moellons d'appareil, en libages [12], en pierre de taille.

On ne paremente jamais une pile en moellons bruts : il y a trop de joints et l'eau les attaque : il y faut des maçonneries assisées avec très peu de joints.

Art. 3. — Noyau. — Le noyau est en moellons ordinaires, en galets, quelquefois en béton, s'il coûte moins.

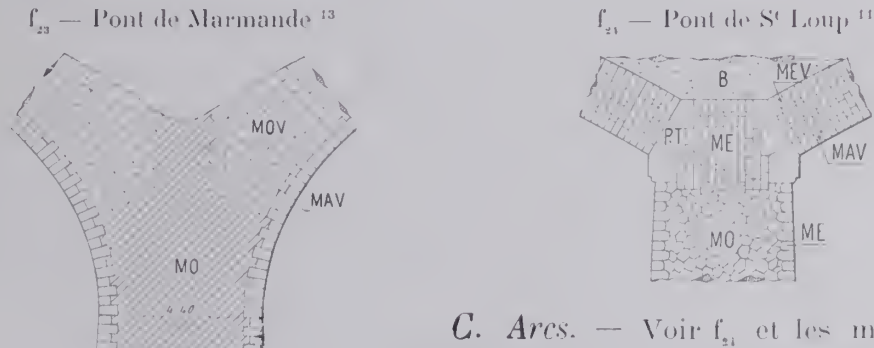
Si l'on craint qu'une trop forte pression tende à séparer le parement du corps, on maçonne la pile au ciment, on la coupe par des assises de libages.

Art. 4. — Appareil à la retombée des voûtes.

A. Pleins cintres. — Je renvoie à l'APPENDICE : Viaducs.

B. Ellipses. — Voir f_{23} et les monographies, Tome I.

f_{23} — Pont de Marmande [13] f_{24} — Pont de St Loup [14]



C. Arcs. — Voir f_{24} et les monographies du Tome III, en particulier les ponts Boucicaut (III, p. 243) et d'Orléans (III, p. 255).

12. — Pont des Amidonniers (I, p. 196bis, f_3). 13. — Voir renvoi 37. 14. — Voir renvoi 21.

Art. 5. — Quelques détails d'appareil. — Dans les arcs à grandes poussées, on dispose, derrière les sommiers en pierre de taille, des moellons équarris par assises verticales (f_{24}).

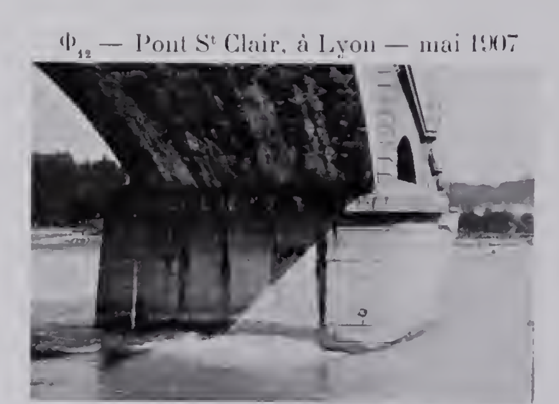
CHAPITRE III

EFFETS DES BECS SUR LE COURANT

Devant un avant-bec, l'eau se gonfle, puis s'écroule de chaque côté en cataractes (Φ_{12}), qui contrarient l'écoulement sous les voûtes et contractent le débouché[45].

Un avant-bec effilé gêne moins l'eau (Φ_{13}).

Φ_{12} — Pont St Clair, à Lyon — mai 1907



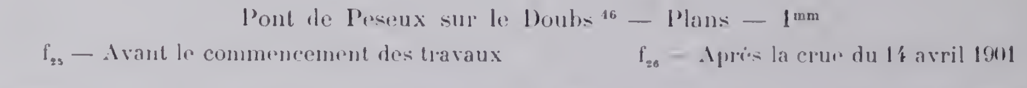
Φ_{13} — Pont d'Avignon — septembre 1903



CHAPITRE IV

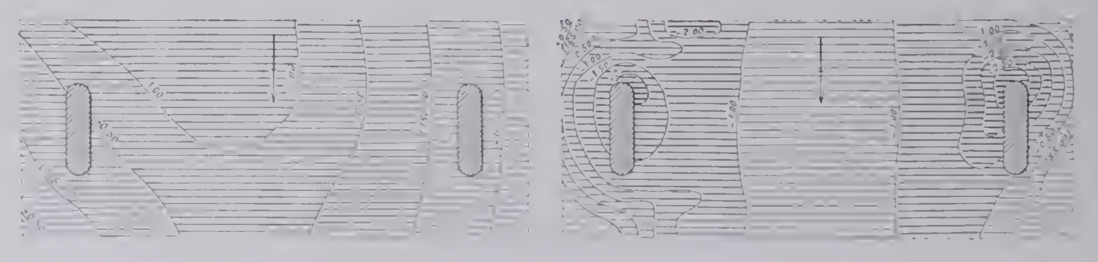
ACTION DES PILES SUR LES FONDS AFFOUILLABLES

La rivière affouille le pied de l'avant-bec (f_{26}), dépose derrière l'arrière-bec.



Pont de Peseux sur le Doubs[46] — Plans — 1^{mm}

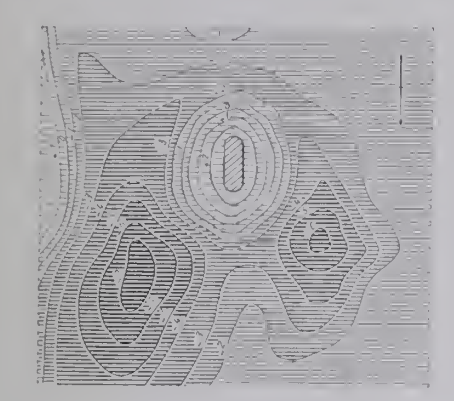
f_{25} — Avant le commencement des travaux — f_{26} — Après la crue du 14 avril 1901



45. — On trouve dans les Cours des valeurs du coefficient de contraction : elles prêtent fort à la critique ; on n'en a pas d'autres.

46. — Ligne de St Jean-de-Losne à Lons-le-Saulnier.

f_{27} — Passerelle du Collège, à Lyon

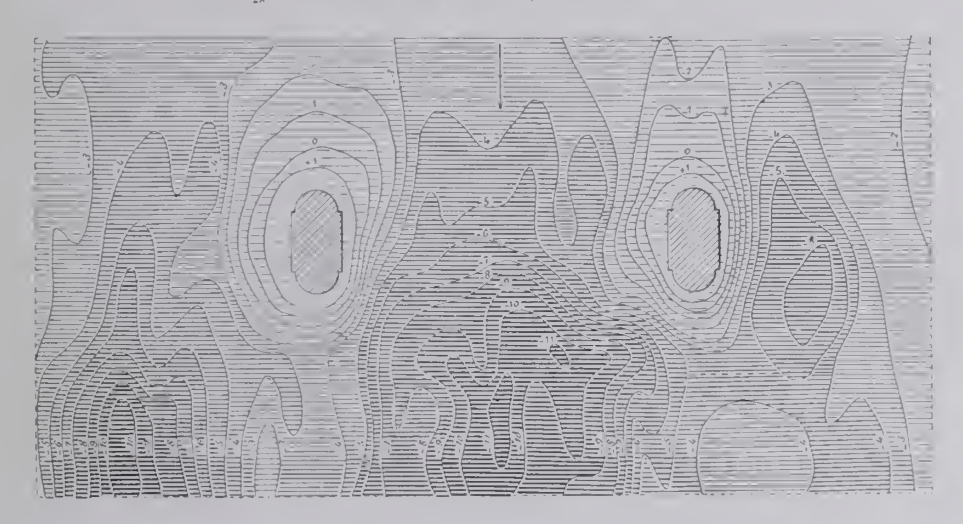


Quand on n'a pas fondé assez bas, on a défendu par des enrochements le sol affouillable.

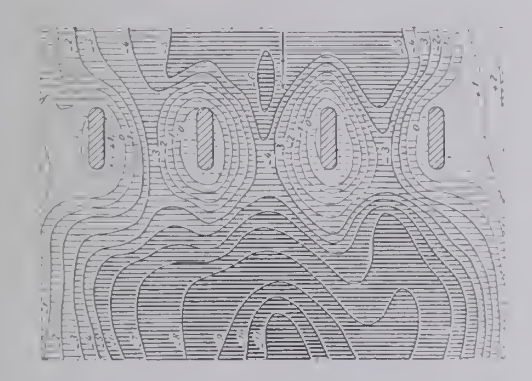
Sous un pont à très grandes portées, une pile entourée d'enrochements creuse deux trous à l'aval (f_{27}).

Sous de moindres, les affouillements d'aval se réunissent en un seul, dans l'axe des voûtes (f_{28}).

f_{28} — Pont de Tarascon, sur le Rhône [47]



f_{29} — Pont de Serin, sur la Saône, à Lyon



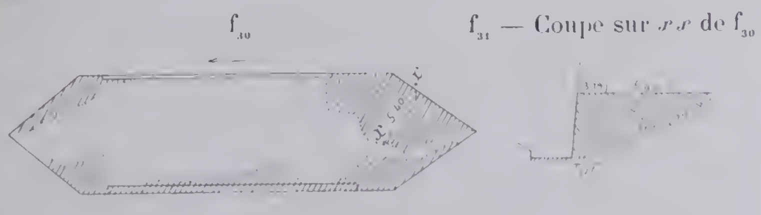
A l'aval d'un pont à trop petites arches, il y a un creux général en travers de la rivière (f_{29}), comme à l'aval d'un barrage.

Certains terrains compacts, incompressibles, sont lentement affouillables (tuf de la Garonne) [48], non par une crue, mais par l'action continue des eaux.

En tout terrain, il faut fonder au-dessous des plus grands affouillements connus.

Avec l'air comprimé, c'est souvent facile, toujours possible : un Ingénieur qui ne fonde pas assez bas est aujourd'hui sans excuse.

f_{30} — f_{31} — Coupe sur xx de f_{30}



47. — Ligne de Tarascon à Cette (1851).

48. — Au vieux pont de Toulouse (1542-1632), la pile 3 a été affouillée jusqu'à 5m40 (f_{30}, f_{31}).

TITRE V

CULÉES

CHAPITRE I

COMMENT ON CALCULE LEURS DIMENSIONS

§ 1. — *EFFORTS QUE SUPPORTENT LES CULÉES*

Art. 1. — De la part des voûtes. — Sur les piles, les poids, les surcharges ne produisent que des efforts verticaux ou à peu près : mais sur les culées, ils se résolvent en poussée.

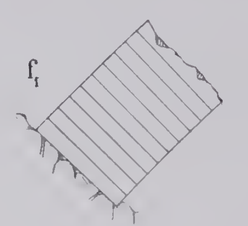
Moins la voûte a de flèche, plus la poussée est inclinée.

Art. 2. — De la part des terres. — La poussée des terres[1] agit en sens contraire de celle de la voûte ; elle soulage l'arête postérieure de la culée ; elle en écarte la courbe de pression.

Dans le calcul de la culée, on n'en tient pas compte : on ne remblaie en effet l'ouvrage qu'achevé ; la culée doit avoir résisté à la poussée de la voûte sans l'aide de celle des terres.

§ 2. — *CE QU'IL FAUT POUR RÉSISTER AUX EFFORTS*

Art. 1. — La voûte retombe sur le rocher. — On taille le rocher suivant le dernier lit : c'est le cas des passages supérieurs sur tranchées en rocher, des arches jetées par-dessus un torrent entre deux parois de rocher.



Art. 2. — La culée résiste par son poids.

Si l'on a fondé par épuisement dans un batardeau, ou sur pilotis, ou à l'air comprimé, le sol de fondation est à peu près horizontal : c'est par son poids que la culée résiste à la poussée.

A toute hauteur, la maçonnerie doit ne pas s'écraser, ne pas se couper horizontalement[2].

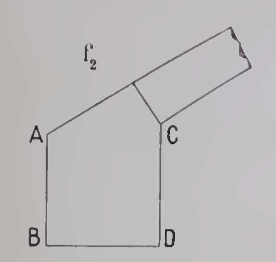
La culée ne doit ni s'enfoncer dans le sol[3], ni glisser sur lui.

1. — Voir les Tableaux numériques de M. Flamant Annales des Ponts et Chaussees 1885, 1er semestre, p. 523), reproduits à la fin du Cours de *Ponts en maçonnerie* de MM. Degrand et Resal, Tome I, p. 380 et suivantes.

2. — Soient, par rapport au pied de l'arête postérieure : $\mathcal{M}_s$ le moment de stabilité, $\mathcal{M}_r$ le moment de renversement. — On a souvent admis que le rapport $C = \dfrac{\mathcal{M}_s}{\mathcal{M}_r}$ dit « coefficient de stabilité » mesurait la stabilité de la culée, et qu'elle était stable avec $C = 1{,}5$. M. Resal a montré que cette conception était fausse, dangereuse ; que, pour la stabilité de l'ouvrage, on n'en pouvait rien conclure (*Stabilité des Constructions*, p. 559 et suivantes). — Ce n'est pas le rapport $\dfrac{\mathcal{M}_s}{\mathcal{M}_r}$ qui est intéressant, mais la différence $\mathcal{M}_s - \mathcal{M}_r$, laquelle entre dans l'expression de la pression maxima.

3. — Pour une même pression par unité, la déformation du sol croîtrait avec la surface de fondation. Zentralblatt der Bauverwaltung, 1893, p. 306 à 308 : « *Zur Theorie des Baugrundes* » Fr. Engesser.

Enfin, elle doit être rigide, c'est-à-dire ne pas se courber sous la poussée. L'arête postérieure AB (f_2) est plus comprimée que CD : le haut de la culée reculera donc légèrement sous la poussée[4] : elle pliera comme un poteau vertical élastique encastré à son pied, poussé horizontalement à son sommet[5].



Pour calculer les pressions dans les voûtes, on suppose expressément que les retombées ne reculent pas.

Les appuis d'un arc très surbaissé à grande portée doivent être invariables : le moindre déplacement horizontal est dangereux.

Sur des culées hautes, conviennent des pleins cintres, des ellipses surhaussées.

Plus le sol est douteux, moins il faut le charger, plus il faut de flèche.

Les voûtes très surbaissées exigent des culées rigides, partant, très longues[6].

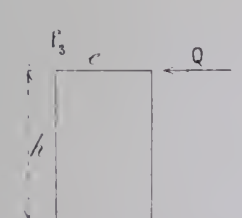
CHAPITRE II

DISPOSITIONS DES CULÉES

§ 1. — *RENVOI AUX MONOGRAPHIES ET A L'APPENDICE*

Les culées se font à la demande du terrain.

Je renvoie aux monographies (Tomes I à IV) pour celles des voûtes de 40m et plus, — à l'APPENDICE pour celles des ouvrages courants et des viaducs.



4. — Soit une culée d'épaisseur constante e, soumise à une poussée Q ; le déplacement au sommet est : $f = \frac{2Qh^3}{Ee^3}$.

D'où : $e = h\sqrt[3]{\frac{2Q}{Ef}}$

e varie : pour un même déplacement f, comme la hauteur h ; pour un même travail à toute hauteur, comme $\sqrt{h}$.

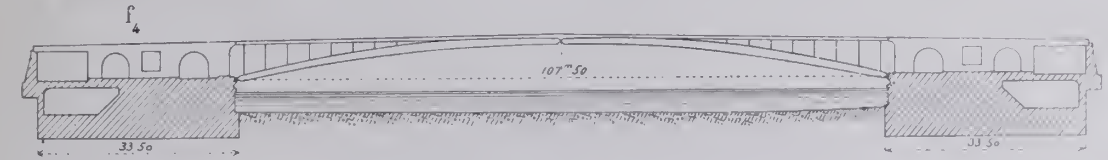
M. Résal : « *Stabilité des Constructions* », p. 556.

5. — Arche d'expériences de Souppes (Portée = 37m886, Surbaissement 1/18).
La culée avait 15m10 : on a enlevé à l'arrière des tranches verticales.

Quand elle a été réduite de	à	le tassement total à la clef a été de :
15m10	12m10	0mm3
12m10	10m10	2mm7
10m10	7m10	6mm3

A 7m10, la culée ne se renversait pas, ne s'écrasait pas ; mais elle commençait à plier sous la poussée. Voir Tome III, p. 376, renvoi 31.

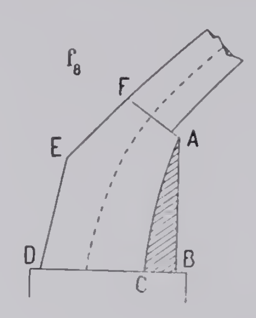
6. — Au pont Alexandre III (f_4) (arcs d'acier de 107m50 au 1/17e), les deux culées ont ensemble 67m, — les 64/100 de la portée.



§ 2. — *ÉPAISSEURS*

On les détermine par une épure [7,8].

§ 3. — *CULÉES A PAREMENT ANTÉRIEUR EN PORTE-A-FAUX OU EN ENCORBELLEMENT. — CULÉES PERDUES*



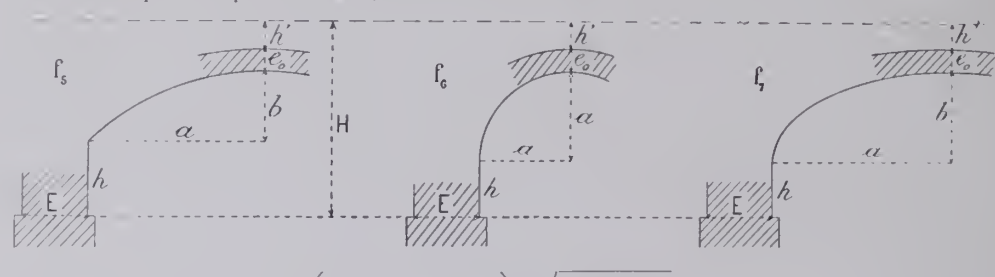
Dans une culée telle que f_8, la maçonnerie ABC travaille peu ; on peut la supprimer.

La culée en porte-à-faux, fort économique, est à adopter pour les grandes voûtes par-dessus les torrents, les ravins profonds.

On peut faire ainsi, non seulement avec retombées inclinées (Lavaur [9], Antoinette [10], Luxembourg [11], Amidonniers [12], — passages supérieurs en tranchée de rocher), mais même avec fondations profondes sur sol horizontal [12bis].

7. — Appendice, — Comment on calcule une voûte.

8. — Voici, pour un premier essai, les formules de Léveillé :



Arc de cercle (f_5) : $E = \left(0{,}33 + 0{,}212\,(2a)\right)\sqrt{\dfrac{h \times (2a)}{H\,(b + e_0)}}$.

Plein cintre (f_6) : $E = \left(0{,}60 + 0{,}162\,(2a)\right)\sqrt{\dfrac{[h + 0{,}25\,(2a)] \times 0{,}865\,(2a)}{H\,[0{,}25\,(2a) + e_0]}}$.

Anse de panier (f_7) : $E = \left(0{,}43 + 0{,}154\,(2a)\right)\sqrt{\dfrac{(h + 0{,}54\,b) \times 0{,}84\,(2a)}{H\,[0{,}465\,b + e_0]}}$.

« *Note sur les Ponts en maçonnerie* » par M. Léveillé, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. (Extrait du Bulletin de la Société d'Agriculture, Sciences et Arts de la Sarthe, — Le Mans, Imprimerie Monnoyer, 1855).

Voici, pour 3 ponts en arc, l'épaisseur calculée par la formule Léveillé et celle qu'on a adoptée :

Ponts	Formule Léveillé	Épaisseur adoptée
Boucicaut (III, p. 243).	13m06	14m07
de la Farelle (1877-1880 — *Ligne de Mende à Séverac*).	11m18	11m35
d'Orléans (III, p. 255).	15m07	15m

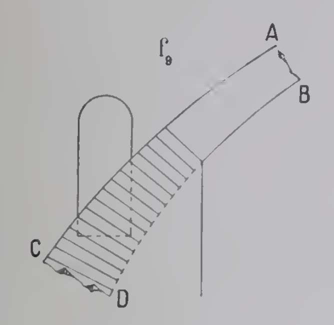
9. — II, p. 135 ; 10. — II, p. 145. — Le grès mollasse a été taillé suivant le lit de la dernière assise.

11. — II, p. 67. — Grès en petites assises horizontales. Les fouilles faites formaient une série de petits ressauts. On les a noyés dans du béton de ciment, damé suivant la courbe de la retombée.

12. — I, p. 193.

12bis. — Höfen (IV, p. 41), Marbach (IV, p. 45), Munderkingen (IV, p. 55), Grasdorf (IV, p. 129), Göhren (IV, p. 139), Inzigkofen (IV, p. 225), Neckarhausen (IV, p. 232), Teinach (III, p. 203), Mehring (III, p. 252), Cassel (III, p. 303).

Pour résister à la poussée, on a quelquefois chargé les culées perdues en avant du porte-à-faux [13].



§ 4. — *CULÉES ÉVIDÉES*

Il ne faut pas couper ou entailler la retombée d'une grande voûte ABCD (f_9) par un évidement transversal allant d'un tympan à l'autre.

Mais il est permis d'évider par des puits ronds de petit diamètre la culée d'un plein cintre [13 bis] : la poussée passe autour des puits.

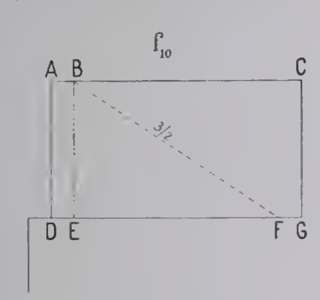
§ 5. — *PRÉCAUTIONS CONTRE LE GLISSEMENT*

Quand on le peut, on découpe le sol normalement à la résultante des efforts [14] ; on bute le massif contre le rocher ; on dispose des ergots [15], des gradins [16] ; on élargit la culée par rapport à la voûte [17].

§ 6. — *CULÉES LONGUES ET HAUTES*

COMMENT ON SUPPORTE ÉCONOMIQUEMENT L'ABOUT DU PARAPET

Soient (f_{10}) : BF la trace du quart de cône sur le mur de la culée, EF sa projection horizontale.



En AB, pour que l'extrémité A ne soit pas déchaussée, on ménage un jeu de 0^m30 ou 0^m40 ; de même, en FG, pour garantir le pied du talus.

L'extrémité A ne sert qu'à porter le garde-corps : si la culée est haute, la fondation profonde, on la mettra en porte-à-faux :

sur des dalles portées par des consoles ;

sur des voûtains portés par des corbeaux ;

13. — Hofen (IV, p. 41), Marbach (IV, p. 45), Baiersbronn (IV, p. 48), Inzigkofen (IV, p. 225), Neckarhausen (IV, p. 232), Mehring (III, p. 253), Cassel (III, p. 303).

13bis. — Voir Appendice, Viaducs.

14. — Lavaur (II, p. 135), Antoinette (II, p. 145), Luxembourg (II, p. 67), Amidonniers (I, p. 193).

15. — Marbach (IV, p. 45), Prince-Régent (IV, p. 239), Max-Joseph (IV, p. 242), Gohren (IV, p. 139).

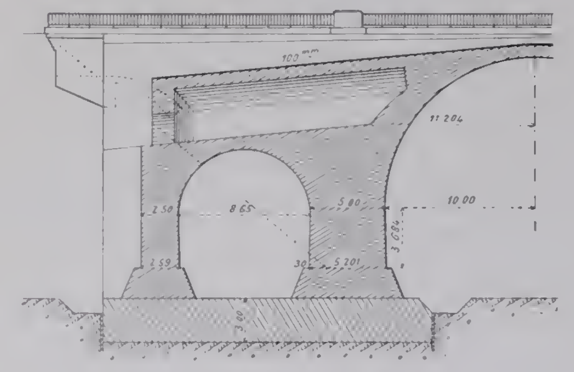
16. — Teinach (III, p. 203), Illerbeuren (IV, p. 159), Moulins-lez-Metz (IV, p. 202).

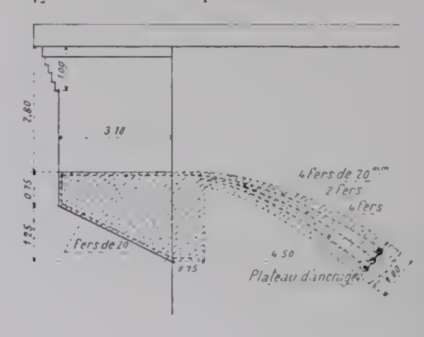
17. — Neckarhausen (IV, p. 232), Prince-Régent (IV, p. 239).

maintenant, sur des consoles en béton armé (f_{12}, f_{13})[18] : les consoles doivent rester cachées dans le quart de cône ;

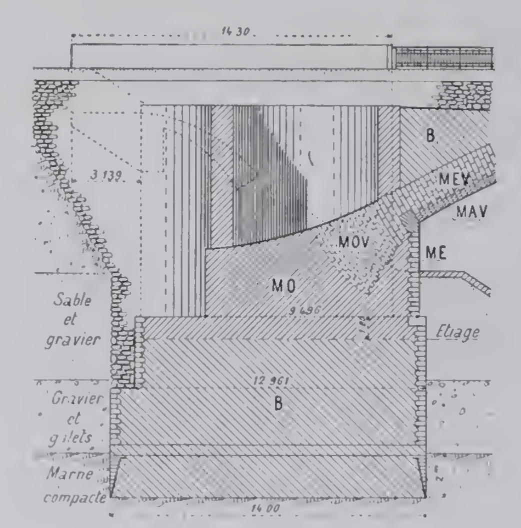
Viaduc d'Issy[18]


f_{11} — Coupe en long d'une culée — 2mm f_{12} — About en porte-à-faux — 5mm



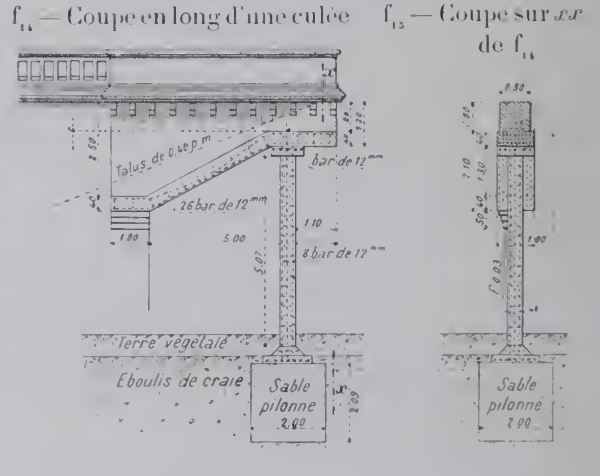


f_{13} — Pont de St-Loup[19] — 3mm

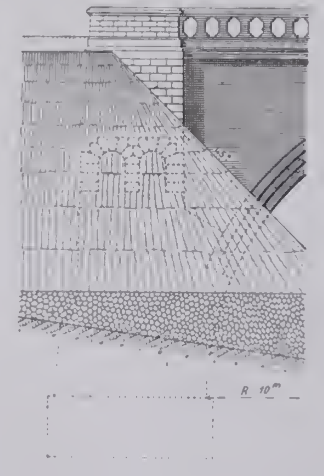


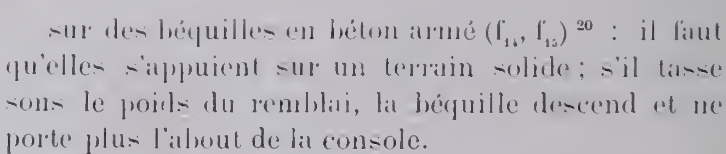
Viaduc de la Lieure[20] — 5mm

f_{14} — Coupe en long d'une culée f_{15} — Coupe sur xx de f_{14}



f_{16} — Pont de St-Waast[21] — 5mm




sur des béquilles en béton armé (f_{14}, f_{15})[20] : il faut qu'elles s'appuient sur un terrain solide ; s'il tasse sous le poids du remblai, la béquille descend et ne porte plus l'about de la console.

De même, pour porter un dé à l'about du parapet, on n'élargira pas la culée sur toute sa hauteur : on le mettra en porte-à-faux sur des voûtains (f_{16}).

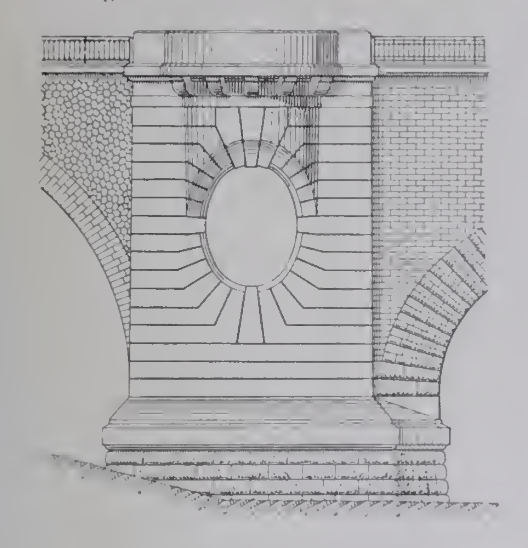
18. — « *Note sur les travaux de la ligne d'Issy à Viroflay* ». M. Rabut, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Ingénieur Principal de la Cie de l'Ouest. (Revue Générale des Chemins de fer, juillet 1902, p. 13).

19. — sur l'Allier (1910-13). Ligne de la Ferté à Gannat, 7 arcs de 33m à I 7.5.

20. — Ouvrages de la ligne de Charleval à Serqueux. M. Rabut.

21. — sur l'Agoût (1882-84). Ligne de Montauban à Castres.

f_{17} — Pont d'Orzillac [22] — 4mm



§ 7. — *CULÉES ENTRE ARCHES INÉGALES*

Une large culée entre l'ouvrage principal et des arches d'accès n'est point agréable à voir : on l'accidente souvent par des pilastres (Φ_1) : on y ouvre un œil-de-bœuf (f_{17}, Φ_2).

Φ_1 — Pont de Marmande [23]



Φ_2 — Pont de Passy [24]



CHAPITRE III

MATÉRIAUX. — APPAREIL

Art. 1. — Parement[25]. — Suivant l'expression à donner, les faces seront en moellons bruts (MOI)[26], en moellons assisés (MOII, MEII)[26], avec arêtes en moellons d'appareil (MA)[26], en libages (L)[26].

La culée doit être et paraître robuste.

Il convient souvent d'y supprimer la plinthe[25] :

Les culées ne sont pas l'ouvrage : elles l'encadrent ; elles peuvent être brutales[27].

22. — sur la Loire. Ligne du Puy à Nieigles-Prades (Projet).

23. — Voir renvoi 37, p. 37.

24. — Ligne Paris-St-Lazare-Invalides (Projet de M. Bonnet, Ingenieur en chef des Ponts et Chaussées et de la Cie de l'Ouest).

25. — Voir à l'Appendice, l'appareil des culées des petits ouvrages, des viaducs.

26. — Pour le sens de ces abreviations, voir Titre I, p. 7.

27. — Luxembourg (II, p. 67).

Art. 2. — Corps de la culée. — Disposition des assises. —

Les voûtes sont en matériaux de choix : on y admet un travail élevé. Mais leurs culées, sauf celles des très grandes, sont en " MO "[28], tout au plus en " MOV "[28] : on y abaisse le travail.

Sous les retombées des très grandes, on range les moellons par assises courbes, normales à la pression et aux deux parements.

Dans les voûtes en ellipse, les culées commencent aux reins.

Dans les culées des grands arcs surbaissés, le devant, qui travaille peu, reste en moellons ordinaires. On appareille la retombée de la voûte : c'est comme une culée perdue dans la maçonnerie (f_{33}).

Art. 3. — Culées armées. —

A des ponts allemands récents[29], fondés sur pilotis, on a noyé dans les culées plusieurs cours de rails.

Dans des ponts autrichiens, on a étalé la pression sur le sol par une dalle en béton, armée de rails[30].

28. — Voir renvoi 26.

29. — Wengern (III, p. 207), Ziegenhals (III, p. 208), Krappitz (III, p. 265), Gross-Kunzendorf (III, p. 267).

30. — Pa[illegible]graben (II, p. 165), Schalchgraben (II, p. 169), Krenngraben (III, p. 134), Salcano (III, p. 141).

Au viaduc de Morez (Ligne de Morez à Saint-Claude. — 9 arches en plein cintre de 20m, 1909-11), nous avons ainsi réduit la pression de $7^{k}4$ à $3^{k}4$ sur l'argile, — de $7^{k}4$ à $5^{k}8$ sur la moraine.

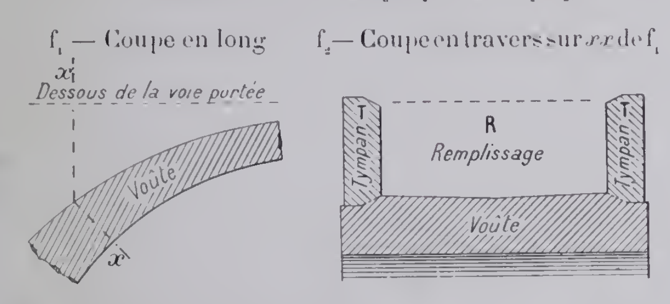
TITRE VI

VOLUME ENTRE LES GRANDES VOÛTES ET LA VOIE PORTÉE

CHAPITRE I

VOLUME PLEIN

Art. 1. — Tympans. — Le volume entre le dessus des grandes voûtes et le dessous de la voie portée est occupé par un remplissage R entre deux murs de tête T, dits tympans[1] (f_1, f_2).



Art. 2. — Murs de tête. Matériaux et appareil. — Les tympans chargent les voûtes et travaillent peu.

Il y faut des matériaux légers[2], et qui paraissent légers, au besoin peu résistants : ce qui est porté doit être et paraître moins lourd que ce qui porte. Même dans une très grande ville, il n'y faut point de grand appareil.

On y a employé du tuf[3], des briques[4], du béton[5], soit sur toute l'épaisseur, soit seulement en parement ; on a doublé de béton maigre un mince parement[6].

C'est à tort qu'on les a faits parfois en meilleurs matériaux que la voûte[7].

Il peut convenir de les distinguer des voûtes et du couronnement par la couleur (briques[8]), par la taille des matériaux (joints incertains...),....

1. — Pour l'épaisseur des tympans et le remplissage entre eux, pour l'appareil le long des bandeaux, voir Appendice, Viaducs.

2. — Les Romains ont très souvent employé dans leurs voûtes pour y réduire les efforts, des ponces, des tufs volcaniques poreux (Colisée, Thermes de Titus et de Caracalla,....) à l'exclusion des pierres à tissu compact. (Choisy : *L'Art de bâtir chez les Romains*, p. 96).

3. — Les tympans sont : au pont du Diable (I, p. 116) en tuf lacustre de Pæstum pesant 1000^k et s'écrasant à 10^k ; au pont de Fium'Alto (I, p. 110), en maçonnerie s'écrasant à 32^k.

4. — Putney (III, p. 239) : corps en briques.

5. — Parements en béton moulé aux ponts de : Krenngraben (III, p. 134), Steyrling (III, p. 137), Palmgraben (II, p. 164), Schalchgraben (II, p. 168).

6. — Boucicaut (III. p. 243).

7. — Tympans en pierre et voûtes en briques : Calcio (III, p. 100), Diveria (III, p. 130) ; viaducs italiens, notamment ceux de la ligne en construction de Coni à Vintimille.
Tympans en pierre de taille et voûtes en béton : Coulouvrenière (IV, p. 81),...

8. — Antoinette (II, p. 145), Verdun-sur-le-Doubs (I, p. 165), Orléans (III, p. 255), Amidonniers (I, p. 193).

CHAPITRE II

AU-DESSUS DE QUELLES VOÛTES A-T-ON ÉVIDÉ, ET COMMENT ?

§ 1. — *QUAND FAUT-IL, QUAND NE FAUT-IL PAS ÉVIDER ?*

Même en matériaux légers, le volume entre l'extrados et le dessous de la voie ne laisse pas de peser lourdement sur les voûtes.

Quand il est grand, — c'est-à-dire au-dessus des grandes voûtes peu surbaissées, — il y a intérêt à l'évider[9].

On n'évide pas, - ou guère, - au-dessus des pleins cintres de moins de 15^m[10], des arcs peu surbaissés ou des ellipses de moins de 20^m, des arcs très plats de toute portée[11].

On n'évide pas non plus de façon apparente un pont bas, qu'on veut massif, robuste.

§ 2. — *COMMENT ON ÉVIDE*

On évide :

soit en travers, par des voûtes s'arrêtant aux murs de tête (évidements cachés), ou les traversant (évidements apparents) ;

soit en long, par des voûtes, par des dalles ;

soit à la fois en long et en travers : voûtes sur arcades, voûtes d'arête, dalles sur piliers.

Voici ce qui a été fait au-dessus des voûtes de 40^m et plus :

Ponts construits				Pleins cintres C	Ellipses E	Arcs peu surb. Â	Arcs assez surb. Â	Arcs très surb. Ā	En tout			
avant 1881	Pas d'évidements			2	5	5	6	1	»	»	19	42
	Évidements	en travers	cachés	»	3	2	2	»	7	11	23	
			vus	1	1	1	1	»	4			
		en long	sous voûtes	3	1	1	2	»	7	11		
			sous dalles ou plate-forme	1	2	1	»	»	4			
		dans les 2 sens	cachés	»	»	»	»	1	1	1		
			vus	»	»	»	»	»	»			
après 1881	Pas d'évidements			»	2	1	7	14	»	»	24	111
	Évidements	en travers	cachés	»	»	»	»	1	1	60	87	
			vus	4	5	16	17	17	59			
		en long	sous voûtes	1	2	»	2	2	7	13		
			sous dalles ou plate-forme	»	»	»	1	5	6			
		dans les 2 sens	cachés	1	»	»	»	4	5	14		
			vus	»	»	»	2	7	9			

Ainsi, depuis 1881, on a construit 111 ponts à voûtes de 40^m et plus : on en a évidé 87, dont 59 par des voûtes transversales apparentes.

9. — En élégissant, on a abaissé la pression moyenne à la clef, au passage d'un train, de 19^k à 17^k au pont de Lavaur, de 20^k à 18^k au pont Antoinette.

10. — APPENDICE ; — Viaducs.

11. — Arcs très surbaissés, de 40^m et plus, à tympans non évidés :

Pont	Tome, p.	Portée	Surbaissem^t	Pont	Tome, p.	Portée	Surbaissem^t
Mosca	III-199	45^m	1/8.18	de Ziegenhals	III-208	40^m	1/9.52
Boucicaut	III-213	40	1/8	de Neuhammer	III-211	52	1/8.7
de Huzenbach	III-206	41.50	1/8.25	de Gross-Kunzendorf	III-267	40	1/9.52
de Malling	IV-175	40	1/8.56	d'Avignon	III-270	40	1/8
Cornélius	IV-180	41	1/12	de Bellows-Falls	III-225	42.67	1/7

CHAPITRE III

ÉVIDEMENTS TRANSVERSAUX CACHÉS

Le mur de tympan n'y est qu'un masque.

On a évidé, on évide ainsi des viaducs à plein cintre[12].

Sur 8 ponts ayant des voûtes de 40^m et plus, à évidements transversaux cachés, un seulement est postérieur à 1881[13].

C'est un mode d'évidement fort ancien[14].

CHAPITRE IV

ÉVIDEMENTS TRANSVERSAUX APPARENTS

§ 1. — *VIADUC D'ÉVIDEMENT A PETITES ARCHES EN PLEIN CINTRE COURANT SUR LE DOS DE LA GRANDE VOÛTE*

Art. 1. — Ponts à une seule grande arche.

Voici ce qui a été fait :

Voie portée[15]	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes $\geqslant 40^m$, voir la Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbaisst σ	Évidements: Portée $2a'$	Évidements: Rapport $\frac{2a'}{2a}$	Évidements: Piles: Épaisseur E'	Évidements: Piles: Hauteur max. sous clef H'	Évidements: Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
						Pleins cintres C^1					
r^{te}	1899-1900	Brent	Suisse	1 - 34	44^m	»	4^m	*0.090*	1^m00	15^m75	*0.25*
r^{te}	1901-03	Le Bachelard	France	»	32	»	4.08	*0.127*	0.80	10.63	*0.38*
F^r	1898-1900	Rébuzo	France	1 - 48	40	»	4.10	*0.102*	1.10	9.75	*0.42*
F^r	1904-05	Dössenbach	Autriche	»	32	»	1.5, 2.5, 3	*0.092*	1.20 et 1.30	8.3	*0.36*
f^r	1901-02	Solis	Suisse	1 - 55	42	»	3.50	*0.083*	1 et 1.20	7.5	*0.47*
						Ellipses surbaissées E^1					
r^{te}	1886	Saint-Pierre	France	1-120	40	1/3.33	4	*0.100*	0.90	7	*0.57*
r^{te} et F^r	1909-10	Havrincourt	France	»	38.70	1/2.42	3.50	*0.090*	0.80	8.53	*0.41*
						Ellipse surhaussée E^1_h					
f^r	1906-09	Wiesen	Suisse	1-235	55	1/1.65	4	*0.073*	1 — 1.20 / 1.40	21	*0.19*

12. — APPENDICE — Viaducs.

13. — EVIDEMENTS TRANSVERSAUX CACHÉS, AU-DESSUS DE VOÛTES $\geqslant 40^m$:

Évidements :	Dates	Ponts :	Monographie Tome, p.	Portée	Surbaissement
en plein cintre	1812-46	Saint-Etienne *(Autriche)*	II - 55	43^m60	1/2.471
en arc	1351-1583	Tournon *(France)*	II - 35	49.20	1/2.775
	1815-17, 1874-77	Bains de Lucques *(Italie)*	III - 32	47.835	1/6.71
	1857-61	Cabin John *(Etats-Unis)*	III - 75	67.10	1/3.84
	1873-75	Mantes *(France)*	I - 160	40	1/3.5
	1906-07	*Elise (Allemagne)* (voûte articulée)	IV - 151	47.50	1/9.89
annulaires	1868-70	Annibal *(Italie)*	I - 112	55	1/3.92
	1871-72	Diable *(Italie)*	I - 116	55	1/4.06

14. — Au vieux pont d'Orléans, la pile 7 s'était enfoncée en 1758-59 de 49^{cm}. On soulagea les piles 5, 6, 7, 8 en traversant au-dessus d'elles par 3 voûtes la maçonnerie des reins.

Perronet. « *Description des Projets et de la Construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres...* » Paris, Imprimerie royale, MDCCLXXXIII, Tome 2e, p. 14, 15, Pl. XXXIII.

En restaurant le pont de Tours (1764-77), Beaudemoulin a trouvé des voûtes intérieures qui s'appuyaient, par un large empattement, sur les reins des grandes arches. (Annales des Ponts et Chaussées, 1839, 2e semestre, p. 86 à 133.)

15. — Pour le sens des abréviations, voir Préliminaires, p. 3.

Viaduc d'évidement en plein cintre sur le dos d'une grande voûte *(Suite)*.

Voie portée[15]	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes > 40m, voir la Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbaisst σ	Évidements: Portée $2a'$	Évidements: *Rapport* $\frac{2a'}{2a}$	Piles: Épaisseur E'	Piles: Hauteur max. sous clef H'	Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
				Arcs peu surbaissés $\widehat{A}^1$							
	1899-1903	Luxembourg	Luxembourg	67	84m65	1/2.73	5m40	*0.063*	1m08	15.6	*0.34*
	1906-08	Walnut-Lane	États-Unis	83	70.71	1/3.31	6.10	*0.086*	1.22	21.5	*0.25*
	1908-10	Rocky-River		II 95	85.34	1/3.46	6.40	*0.075*	1.22	23.35	*0.27*
rte	1908-12	Constantine	Algérie	107	68.76	1/2.76	4.75 r. d. 4.85 r. g.	*0.070*	1	13.75	*0.35*
	1905-07	Le Bachelard		»	30	1/2.72	5	*0.16*	0.90	7.50	*0.66*
	1882-83	Castelet	France	130	41.20	1/2.94	4	*0.097*	0.80	8.10	*0.49*
	1882-84	Lavaur		135	61.50	1/2.24	4.50	*0.073*	1.10	11.40	*0.39*
	1883-84	Antoinette		II 145	50	1/3.14	4	*0.080*	0.96	9.50	*0.42*
	1883-84	Wäldlitobel	Autriche	157	41	1/3.10	2	*0.050*	1.20	8.50	*0.24*
	1883-85	Céret		160	45	1/2.31	3	*0.066*	1.50	9.10	*0.33*
Fr	1889-90	Villefranche de Conflent	France	»	39.35	1/2.31	4.5 et 5	*0.127*	1	9.30	*0.53*
	1896	Grunièret		»	35.50	1/3.27	3	*0.084*	»	6.19	*0.48*
	1904-05	Palmgraben		164	49	1/3.93	3	*0.061*	1.20	10.20	*0.30*
	1904-05	Schalchgraben	Autriche	168	52	1/3.46	3.20	*0.061*	1.20	10.20	*0.31*
	1904-06	Rothweinbach		171	41	1/2.68	3	*0.072*	1.20	9.25	*0.32*
	1907-09	Escot	France	II 174	56	1/2.99	4.5 r. g. 4.75 r. d.	*0.084*	0.91 0.92	9.25 10	*0.46* *0.48*
	1906-08	Ramounails		186	40.30	1/3.12	3.50 r. d. 4 r. g.	*0.086* *0.099*	0.70 0.90	9 7.5	*0.39* *0.53*
fr	1910-12	Cinuskel	Suisse	189	46.98	1/2,32	4	*0.085*	1 et 1.2	15	*0.27*
	1911-12	Tuoi		194	47.71	1/2.23					
	1910-12	Mela		»	38.96	1/2.44	3.50	*0.090*	1 et 1.2	11.8	*0.29*

Voie portée	Dates	Ponts :	Pays	Tome, p.	Portée $2a$	Surbaisst σ	Portée $2a'$	*Rapport* $\frac{2a'}{2a}$	Épaisseur E'	Hauteur H'	Rapport $\frac{2a'}{H'}$
				Arcs assez surbaissés $\widehat{A}^1$							
	1901	Saint-Chély-du-Tarn		»	39	1/5.41	2.25	*0.057*	0.80	5.74	*0.39*
rte	1908-09	Montanges		III 62	80.29	1/3.92	5.30	*0.066*	1.06	20.40	*0.26*
	1903-04	La Brague	France	»	30	1/6	1.90	*0.063*	0.60	4.25	*0.44*
	1888-89	Gour-Noir		103	62	1/3.73	4.30	*0.069*	0.95	11.20	*0.38*
	1890	Pouch		110	47.85	1/3.68	4.90	*0.102*	1.10	10.50	*0.46*
	1890-91	Freyssinet		112	45	1/4.09	4.50	*0.100*	1.00	8.50	*0.52*
		Jaremeze		114	65	1/3.63	3.60	*0.055*	»	16.80	*0.24*
	1893-94	Jamna	Autriche	118	48	1/4	3.50	*0.072*	»	19.20	*0.34*
		Worochta		III 120	40	1/4	3.50	*0.087*	»	9	*0.39*
		Gutach		122	64	1/3.97	4	*0.062*	1.35	14.38	*0.27*
Fr	1899-1900		Allemagne						1.20		
		Schwändeholzdobel		126	57	1/4	3.50	*0.061*	1	12.50	*0.28*
		Krenngraben		134	40	1/4	2.50	*0.062*	1.20	6.32	*0.39*
	1904-05	Steyrling	Autriche	137	70	1/4.45	3.25	*0.046*	1.25 à 1.45	10.96	*0.30*
		Gratschacher Graben		»	32	1/3.55	3	*0.094*	1.20	5.5	*0.54*
	1904-06	Salcano		141	85	1/3.90	3.4 à 5	*0.058*	1.35 à 1.5	1.9	*0.26*
	1907-09	Langenbrand		152	59	1/4	3.90	*0.066*	1 à 1.35	13.2	*0.30*
	1907-09	Lichtensteig	Allemagne	III 161	42.82	1/3.71	3.50	*0.084*	1 à 1.25	11.5	*0.30*
	1910-11	Krummenau		164	63.26	1/4.57	3.50	*0.055*	1 à 1.2	10	*0.35*
fr	1904-06	Triège Finhaut	Suisse	»	35.40	1/3.64	3	*0.084*	1	8.40	*0.35*
	1909	Malavaux, sur le Rouillon	France	»	35	1/5.22	4	*0.113*	0.8	7	*0.57*

15 — Pour le sens des abréviations, voir Préliminaires, p. 3.

Viaduc d'évidement en plein cintre sur le dos d'une grande voûte *(Suite)*.

Les voûtes articulées sont en italique.

Voie portée [15]	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes ⩾ 40m, voir la Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbai.t σ	Évidements: Portée $2a'$	Évidements: Rapport $\frac{2a'}{2a}$	Évidements: Piles: Épaisseur E'	Évidements: Piles: Hauteur max. sous clef H'	Évidements: Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
		Arcs très surbaissés Ā[1]									
rte	1885	*Höfen*	Allemagne	IV – 41	28m	1/10 (entre rotules)	1m40	*0.05*	0m70	2m60	*0.54*
rte	1899-1900	*Grasdorf*	Allemagne	IV – 129	40.39	1/8.93 (entre rotules)	1.30, 1.40	*0.034*	0.60	3.50	*0.40*
rte	1903-04	*Göhren*	Allemagne	IV – 139	60.56	1/8.89 (entre rotules)	2, 2.40, 2.80	*0.046*	0.9-1	3.50	*0.80*
rte	1903-04	*Illerbeuren*	Allemagne	IV – 159	57.16	1/5.82 (entre rotules)	2.35	*0.041*	0.7 à 0.8	8	*0.29*
aq	1885	Weisenbach	Allemagne	III – 219	40	1/8					
Fr	1902-03	*Morbegno*	Italie	IV – 65	70	1/7	4.50	*0.064*	1.10	8	*0.56*

Ce qui s'évide le mieux, ce sont les reins d'une arche unique peu surbaissée.

On n'évide pas que les ponts de luxe [16].

Art. 2. — Ponts à plusieurs grandes arches.

Intrados Voie portée	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes ⩾ 40m, voir la Monographie, Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbaist σ	Évidements au-dessus des voûtes: Portée $2a'$	Évidements au-dessus des voûtes: Rapport $\frac{2a'}{2a}$	Évidements au-dessus des voûtes: Piles: Épaisseur E'	Évidements au-dessus des voûtes: Piles: Hauteur max. sous clef H'	Évidements au-dessus des voûtes: Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
		Pleins Cintres Cn									
rte	1845	La Cadène, sur la Truyère	France	»	22m10	»	3m	*0.135*	0m80	5m74	*0.52*
rte	1864-66	Albi, sur le Tarn	France	»	27.60	»	4	*0.144*	1.05	7.58	*0.52*
rte	1895-97	Le Chambon, sur la Loire	France	»	28	»	2	*0.071*	0.80	5.40	*0.37*
rte	1899-1901 / 1904-1908	Avenue du Connecticut, à Washington	États-Unis	I – 67	45.72	»	4.27	*0.093*	0.91	13.50	*0.32*
rte	1901-02	Oued Dar-el-Oued	Algérie	»	25	»	2.50	*0.10*	»	»	»
rte	1904-07	Le Rozier, sur le Tarn		»	25	»	3	*0.120*	0.65	7	*0.43*
Fr	1889-92	Saint-Florent, sur le Cher	France	»	30	»	4.30	*0.143*	0.80	7.50	*0.57*
Fr	1890-92	Amélie-les-Bains, sur le Tech	France	»	26	»	2.62	*0.10*	0.70	6.60	*0.40*
fr	1908	Lantosque, sur la Vésubie	France	»	22	»	2.20	*0.10*	0.60	6.20	*0.35*
fr	1903-05	Gros-Vallon		»	22	»	2.20	*0.10*	0.60	6.35	*0.34*
		Ellipses En									
rte	1874-76	Courcelles-sur-Seine	France	»	33m	1/3.3	2.20	*0.067*	0.75	4.20	*0.52*
rte	1895-97	Verdun-sur-le-Doubs	France	I – 165	41	1/4.47	2.32	*0.056*	0.68	3.70	*0.62*
rte	1908-09	Le Creux, sur l'Aumance	France	»	16.30 / 15.70	1/3.26 / 1/3.20	1.60	*0.10*	0.50	4.20	*0.38*
rte	1910-13	Saint-Victor	France	»	23 / 21	1/3	2	*0.09*	0.50	4.13	*0.48*
					19		1.90	*0.10*	0.56	3.77	*0.50*
aq	1870-73	Pont-sur-Yonne	France	I – 213	40	1/5	1.10 à 1.23	*0.029*	0.27 à 0.35	5	*0.22 à 0.25*
Fr	1901-03	Big-Muddy River	États-Unis	I – 225	42.67	1/4.67	3.96	*0.093*	0.61	5	*0.79*

Φ_1 — juillet 1912



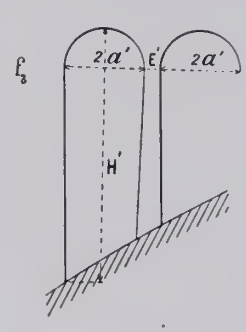
15. — Pour le sens des abréviations, voir Préliminaires, p. 3.

16. — On a évidé presque tous les ouvrages de la ligne qui descend de Bevers à Schuls (Engadine) (Φ_1).

Viaduc d'évidement en plein cintre sur le dos de grandes voûtes *(Suite)*

Les voûtes articulées sont en italique.

Voie portée	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes ⩾ 40m, voir la Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbaisst σ	Évidements: Portée $2a'$	Évidements: *Rapport* $\frac{2a'}{2a}$	Piles: Épaisseur E'	Piles: Hauteur max. sous clef H'	Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
				Arcs assez surbaissés $\widehat{A}^n$							
rte	1892-93	Vals-les-Bains	France	»	20m	1/6.66	1m408	*0.07*	0m45	2m48	*0.56*
rte	1901-02	Oued Amacin	Algérie	»	27	1/6	1.70	*0.063*	0.45	»	»
Fr	1904-06	Canale	Autriche	III-185	40	1/5	2.50	*0.061*	1.20	5	*0.50*
				Arcs très surbaissés $\widetilde{A}^n$							
rte	1900-04	Arciat	France	»	31	1/7.12	2.14	*0.069*	0.68	4	*0.53*
rte	1901-03	*Hochberg*	Allemagne	IV-177	40	1/7.41	1.40	*0.035*	0.60	2.23	*0.62*
rte	1901-05	*Moulins-lez-Metz*	Allemagne	IV-202	44.70 40.54	1/8 1/8.46	1.50	*0.033*	0.60	4.10	*0.36*
rte	1903-04	Mehring	Allemagne	III-252	46	1/7.45	2	*0.043*	0.70	4.50	*0.44*
rte	1905	Krappitz	Allemagne	III-265	50	1/8.33	1	*0.02*	1	3.40	*0.29*
rte	1905-06 1907-08	Schweich Trittenheim	Allemagne	III-268 III-276	46	1/7.45	2	*0.043*	0.70	4	*0.50*
rte	1908-09	Andrézieux	France	»	36.45 33.30	1/7.75 1/8.32	2	*0.054* *0.060*	0.70 et 1	4.07	*0.49*



Art. 3. — Portée $2a'$ des voûtes d'évidement (f3).

On règle la portée $2a'$ au mieux pour l'aspect, d'après la hauteur H'[17], un peu d'après l'ouverture des grandes arches $2a$[18] : on n'a pas dépassé 5m40[19].

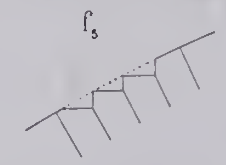
A Luxembourg, les piles trop hautes ont été coupées par deux chapiteaux[20].

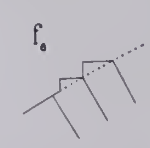
Quelquefois, on a fait varier avec la hauteur H' la portée $2a'$ et l'épaisseur E'[21], ou, pour ne pas avoir de poussées inégales, seulement l'épaisseur E'[22].

Art. 4. — Comment les voûtes d'évidement s'appuient sur les grandes.

— On reçoit les piles des voûtes d'évidement sur les voussoirs des grandes voûtes taillés en crossettes *dépassant l'extrados* (f4).







On a quelquefois, fort à tort, soit creusé la grande voûte (f5), soit découpé un angle rentrant dans une crossette (f6).

On étudiera avec soin l'appareil des crossettes : il n'y faut ni angles rentrants, ni becs de flûte, ni délits.

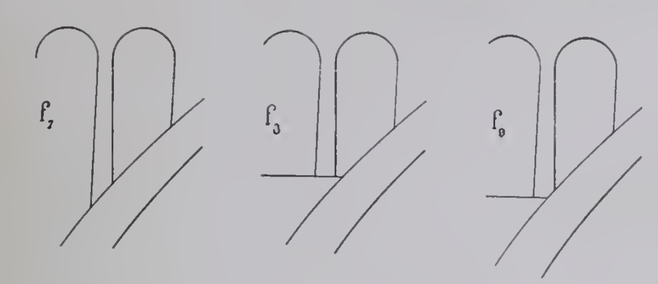
17. — A des ponts à pente unique, $2a'$ n'est pas le même de chaque côté (Constantine, II, p. 107; Escot, II, p. 174; Ramounails, II, p. 186).

18. — On a donné, p. 51 à 54, les rapports $\frac{2a'}{H'}$, $\frac{2a'}{2a}$.   19. — Luxembourg (II, p. 67).

20. — II, p. 68", Pl3, f22.

21. Salcano (III, p. 141), Göhren (IV, p. 139).

22. — Wiesen (I, p. 235), Gutach (III, p. 122), Schwändeholzdobel (III, p. 126), Steyrling (III, p. 137), Langenbrand (III, p. 152), Lichtensteig (III, p. 161), Krummenau (III, p. 164), Illerbeuren (IV, p. 159).



Sur un extrados fuyant, il est difficile d'accrocher les piles (f_7) : on les reçoit plutôt sur le couronnement horizontal d'un mur (f_8)[23], (f_9)[24].

On a quelquefois, dans les grandes voûtes en béton, ancré de hautes piles en béton armé[25].

Dans la disposition des évidements, il faut un peu de goût : on en a quelquefois manqué (Φ_2, Φ_3).

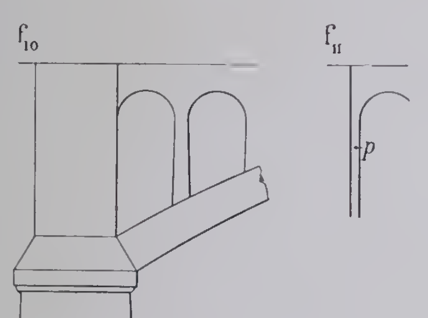
Φ_2



Φ_3



Art. 5. — Ce qu'on met sur les piles des ponts à plusieurs arches. — Un pilastre plein (f_{10})[26] couronne bien un avant-bec qui, autrement, ne porte rien.



Quelquefois on a, d'une arche à l'autre, continué le viaduc d'évidement[27] : dans ce cas, on se gardera d'appuyer une petite pile sur le milieu de la grande.

Art. 6. — Demi-piles le long des culées (p de f_{11}). — On a presque toujours disposé une demi-pile p le long d'un pilastre ou d'une culée.

C'est une recherche inutile. Il y a des demi-piles à Lavaur et au Castelet : on les a supprimées à Luxembourg : c'est plus ferme.

§ 2. — *VIADUC D'ÉVIDEMENT EN ARC DE CERCLE*

On a, quelquefois, évidé par des arcs[28].

Le dernier arc, le plus voisin de la clef, ne fait pas toujours bon effet.

S'il y a un pilastre au-dessus des piles, il faut au moins 3 petites voûtes de chaque côté. Deux font mal : une, c'est pis.

23. — Castelet (II, p. 130). 24. — Lavaur (II, p. 135).

25. — Walnut-Lane (II, p. 83), Rocky River (II, p. 95).

26. — Connecticut (I, p. 67), Big Muddy River (I, p. 225), Mehring (III, p. 252), Orléans (III, p. 255), Schweich (III, p. 268), Trittenheim (III, p. 276), Neckargartach (IV, p. 186), Maximilien (IV, p. 192), Moulins-lez-Metz (IV, 202).

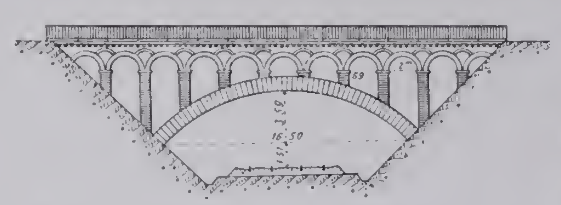
27. — Pont-sur-Yonne (I, p. 213), Verdun-sur-le-Doubs (I, p. 165), Canale (III, p. 185), Amélie-les-Bains, Arciat......

28. — Passerelle de Boulainvilliers (Ligne de Paris-St-Lazare aux Invalides), Orléans (III, p. 255), Maximilien (IV, p. 192). A Orléans, on a armé les voûtes d'évidement.

§ 3. — *VIADUC D'ÉVIDEMENT PASSANT PAR-DESSUS LA CLEF DES GRANDES VOÛTES*

Quelquefois, on a continué le viaduc d'évidement au-dessus de la clef [29] (f_{12}) : c'est évidemment plus cher.

f_{12} — Pont de Bressuire (1867-68) — 2mm



Φ_4 — Pont-canal sur l'Orb, à Béziers (1856-57) [30-a]



Des arches aveugles peuvent dissimuler agréablement la cuvette d'un pont-canal (Φ_4), et fort bien décorer un tympan [30bis].

§ 4. — *OUVRAGES A PLUSIEURS ARCHES : OUVERTURE UNIQUE AU-DESSUS DES PILES*

A quelques ponts, on a traversé le tympan au-dessus des piles par une ouverture unique, pour augmenter le débouché, quelquefois pour décorer l'ouvrage.

Elle est :

en plein cintre [31] (Φ_5) ;

en ogive [32] (Φ_6) ;

en ellipse : au pont des Amidonniers [33], pour l'aspect et le débouché ;

Φ_5 — Pont Fabricius, à Rome — (- 54) [30-b]



Φ_6 — Pont de Montauban — (XIVe) [30-c]



ronde, et simple motif de décoration [34, 35] : ce trou rond est de médiocre effet s'il est petit et encadré d'un maigre bandeau [35] ; au vieux pont de Toulouse (Φ_7),

29. — Big Muddy (1, p. 225). 30. — Dates des photographies : *a* - avril 1908 ; *b* - août 1908 ; c - juin 1902.
30bis. — Façades d'églises romanes.
31. — Ponts Fabricius et Emilius à Rome, — Pont d'Avignon, pont Saint-Esprit.....
32. — Pont de la jeune Fille (XIIe siecle, Perse). Annales des Ponts et Chaussées, juillet, 1883 « *Construction des Ponts en Perse* ». M. Dieulafoy. Pl 19.
33. — 1, p. 193. 34. — Pont d'Orléans (Ligne de Vierzon).
35. — Pont de l'Ile Verte sur l'Isère, près de Grenoble (1897-99) : œil de bœuf avec cadre appareillé.

l'« œil de pont » fait fort bien et augmente le débouché ;

Φ_7 — Vieux Pont de Toulouse (1542-1632) [36 a]

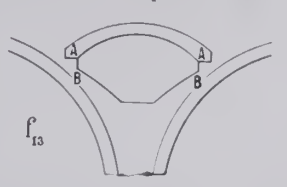


en anneau elliptique à grand axe vertical [36 bis] : ce n'est point à imiter ;

en arc surbaissé : quand on élégit entre deux voûtes par un arc unique, il est bon de ménager un élément vertical AB(f_{13})[37,38] ; l'aspect est peu agréable quand l'arc retombe sur l'extrados [39,40] : à des ponts bas, cet évidement fait bien[41], moins bien au-dessus de hautes piles[37].

Φ_8 36 b





f_{13}

Φ_9



36. — Date des photographies : *a* - septembre 1903 ; *b* - août 1907.

36 bis. — Ponts des Échavannes à Chalon-sur-Saône, 1781-90, (Φ_8) (Gauthey), de Garching (IV, p. 95).

37. — Viaduc de Morez, 1909-11 (Ligne de Morez à Saint-Claude), - pleins cintres de 20m, arcs d'évidement de 8m.

38. — Viaduc de Fontpédrouse, pleins cintres de 17m, arcs d'évidement de 5m80 (Voir Titre XI).

39. — Pont de Plessis-lez-Tours (Ligne de Tours à Vendôme) (1855-57), anses de panier de 24m, arcs d'evidement de 7m.

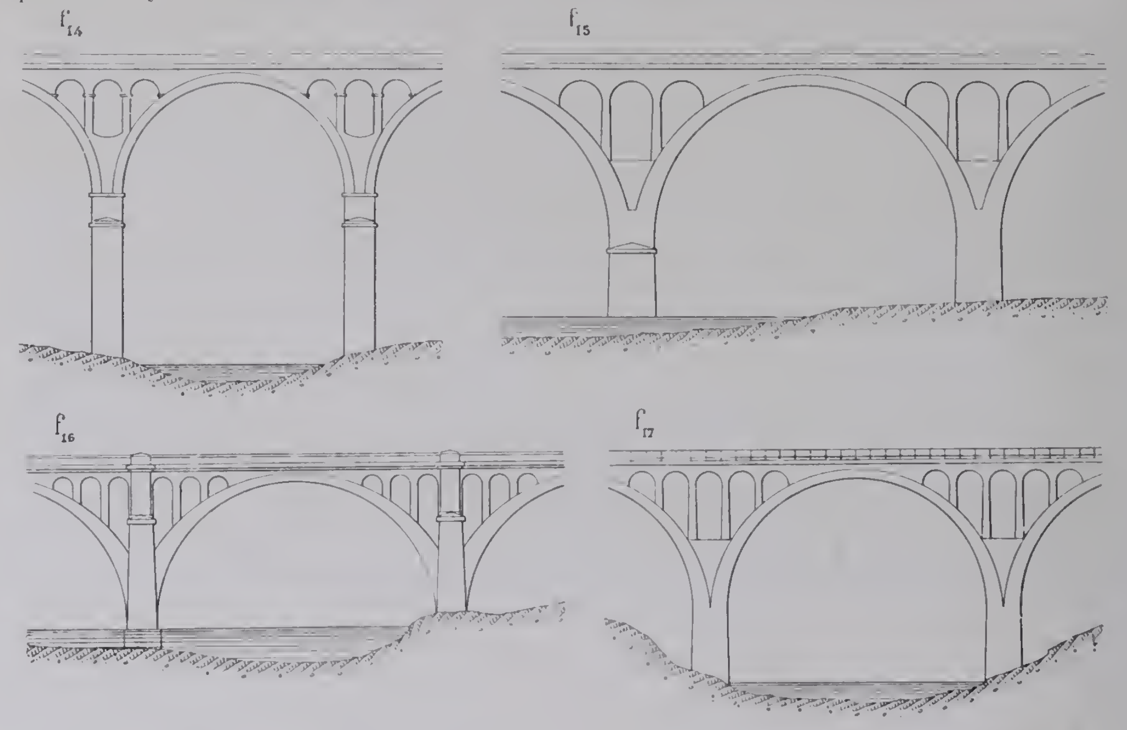
40. — Les deux viaducs de Saint-Chamas (Φ_9) et de la Cadière (Ligne d'Avignon à Marseille, 1847) ont été ainsi évidés : on a fendu un viaduc en plein cintre par le plan vertical de son axe et fait avancer l'une des moitiés, par rapport à l'autre, de la demi-ouverture. — C'est cher et laid. — Fort heureusement, ces ouvrages saugrenus n'ont pas été imités

41. — Amidonniers (I, p. 193).

§ 5. — *CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE*

On ne réussit guère à évider agréablement :

les ponts en plein cintre à plusieurs grandes arches : plus ils sont hauts, plus mal y font les évidements (f_{14} à f_{17})[41 bis].



ni les arcs très surbaissés :

ni les ponts biais : droites ou biaises, les voûtes d'évidement y font très mal, et il est malaisé de les accrocher sur les grandes.

Il ne faut pas que les voûtes d'évidement ou leurs piles retombent sur un extrados trop fuyant : c'est laid et les piles s'y accrochent mal.

Φ_{10} — Pont de la Goule-Noire (1871)[43]



Il n'est pas toujours bon de prolonger sur la culée un viaduc d'évidement ; il conviendra souvent de le faire buter contre des culées pleines.

Il n'est point facile de réussir un évidement unique au-dessus d'une pile : on en a fait de fort laids.

On n'acceptera pas volontiers un arc unique de part et d'autre d'une grande voûte[42] ; encore moins un arc soutenant la culée par la voûte (Φ_{10}).

41 bis. — Silhouettes de 4 ponts existants.

42. — Berdoulet (II, p. 128). Passage supérieur de Camperiès (ligne de Quillan à Rivesaltes).

43. — Route de Villars-de-Lans aux Baraques (Isère) — Date de la photographie : juillet 1908.

§ 6. — *FORME DES GRANDES VOÛTES SOUS DES ARCHES D'ÉVIDEMENT TRANSVERSALES*

Les appuis des évidements transversaux pressent sur une tranche de voûte parallèle aux génératrices, et appellent vers l'extrados la courbe de pression.

Il peut convenir de cambrer l'intrados et l'extrados pour bien l'encadrer et répartir au mieux les efforts, — surtout si l'on évide par une voûte unique qui concentre les charges [44].

CHAPITRE V

ÉVIDEMENTS LONGITUDINAUX

Art. 1. — Avec voûtes [45]. — On trouvera à l'APPENDICE ce qui concerne les voûtes d'évidement longitudinales des viaducs.

On les a adoptées plutôt sur les voûtes moyennes [46, 47] que sur les très grandes : elles ont moins d'appareil, moins de parement.

Sur 153 ponts à voûtes de 40m et plus, 12 seulement sont ainsi évidés [48].

Sur des arches de grande montée, on a posé plusieurs étages de voûtes [49].

Pour qu'elles pèsent moins, on peut faire en briques voûtes et cloisons.

Elles sont en plein cintre [48], en arc [48], mieux, en ogive [48, 50], en ellipse surhaussée, pour moins pousser les tympans.

Toutes poussent les tympans, d'autant plus que plus grandes, plus surbaissées.

44. — Au viaduc de Nérard (Ligne de Saint-Germain-des-Fossés à Roanne), des arceaux ont repoussé à l'intérieur, de 0m02 environ, leurs appuis sur les grandes voûtes.
Croizette-Desnoyers, *Construction des Ponts*, Tome II, p. 84.

45. — Il y a des évidements longitudinaux au pont Rouge (milieu du XIe siècle), au pont de la Jeune Fille (milieu du XIIe siècle). Loc. cit. renvoi 32, p. 26, Pl. 18, fig. 3 ; p. 38, Pl. 19, fig. 3.

46. — C'est le mode d'évidement ordinaire des ouvrages de Morandière et de ses élèves : Ponts de Chalonnes, de Nantes (ellipses de 30m) ; viaducs de Port-Launay (22m), de Pompadour (25m), du Blanc (20m), ...

47. — Voir APPENDICE, Viaducs.

48. — VOUTES D'ÉVIDEMENT LONGITUDINALES AU-DESSUS DE VOUTES ≥ 40m :

Les voûtes articulées sont en italique.

	Dates	Ponts	Voir Monographie Tome, p.	Grandes voûtes		Évidements		Épaisseur des murs	
				Portée	Surbaiss^t	Nombre	Portée	de tête	intermédiaire
en plein cintre	1840-44	Nydeck *(Suisse)*.	II-51	45m90	1/2.51	3	»	»	»
	1855-56	Nogent-sur-Marne (France)	I-79	50	»	5 (1 ét. [49])	0m80, 0m95, 1m20	0m90	0m60
	1860-61	St-Sauveur (France)	I-27	42	»	2	»	»	»
	1869-73	Collonges (France)	I-31	40	»	1	1	1.50	»
	1881-82	Oloron (France)	I-45	40	»	3 2	1.50 1.65	»	0.90
	1882	Teinach *(Allemagne)*	III-203	33 (retombées)	1/10	3	1	0.80	0.59
	1895-96	*Coulouvrenière (Suisse)*.	IV-81	40	1/7.11	9 3 et [illegible]	1.40	1.25	0.45
en arc	1854-55	Alma *(France)*.	I-153	43	1/5	7	2.12 à 2.95	1.00	0.35
	1896-97	Bellefield *(États-Unis)*.	III-19	45.72	1/1.10	7	2.21 et 2.59	1.68	0.69
	1901-03	Édouard VII *(Angleterre)*	I-182	40.537	1/5.13	11	»	»	»
	1903-05	Plauen *(Allemagne)*.	III-52	90	1/5	6	1 de 1.50 2 de 1.80	2.20	0.40
en ogive	1833-31	Chester *(Angleterre)*.	III-29	60.959	1/4.76	4 2 étages	»	»	»

49. — Nogent-sur-Marne (I, p. 80) : 4 étages superposés.

50. — Luxembourg (II, p. 68, I$_6$), au-dessus des voûtes de 21m60.

On les a, quelquefois, tenues avec des tirants de métal. Ils ne sont pas à conseiller : ils ne se dilatent ni ne se contractent de ce qu'il faudrait. Si on en met, il faut les bien noyer dans la maçonnerie, pour qu'ils en aient la température.

Il convient d'aérer par des soupiraux, des jours, les évidements cachés, — les maçonneries se conservent mal dans l'air humide, — et de les visiter. On ménage à cet effet, dans les trottoirs ou l'entrevoie, des regards (trous d'homme) permettant d'y descendre ; on ouvre des passages dans les pieds-droits.

Art. 2. — Dalles sur murs longitudinaux. — Presque tous les ponts anglais sont ainsi évidés [51].

Il n'y a pas de poussée sur les tympans.

Art. 3. — Plate-forme en béton ou métallique sur murs longitudinaux. — On a ainsi évidé quelques ponts allemands [52].

Art. 4. — Répartition des efforts dans les grandes voûtes sous évidements longitudinaux. — Entre les pieds-droits des voûtes longitudinales ou des dalles, les grandes voûtes ne portent rien : les charges y sont mal réparties [53].

51. ÉVIDEMENTS LONGITUDINAUX SOUS DALLES AU-DESSUS DE VOÛTES > 40m :

Dates	Ponts :		Pour les voûtes > 40m voir Monographie, Tome , p.	Grandes voûtes		Évidements		Épaisseur des murs	
				Portée	Surbaissement	Nombre	Portée	de tête	intermédiaires
1824-31	Londres	Angleterre	I-117	16m33	1/4.02	8	»	»	»
1826-27	Gloucester	Angleterre	I-107	45.72	1/1.29	5	»	1m07	0m61
1836-38	Victoria	Angleterre	II-201	48.77 13.89	1/2.22 »	4	»	»	»
1846-48	Ballochmyle	Angleterre	I-41	55.168	»	5	0m91	0.76	0.61
1882-83	Putney	Angleterre	III-239	43.891	1/7.46	8	1.06 et 1.07	»	0.57
1891-92	Wheeling (États-Unis)		III-47	48.163	1/5.612	9	0.86 et 0.89	0.91	0.61

52. ÉVIDEMENTS LONGITUDINAUX SOUS PLATE-FORME :

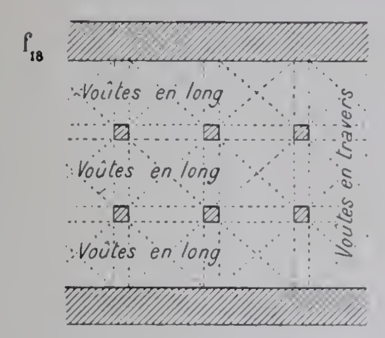
Les voûtes articulées sont en italiques.

Plate-forme	Dates	Ponts : *Tous sont en Allemagne*	Voir Monographie, Tome , p.	Grandes voûtes		Évidements		Épaisseur des murs	
				Portée	Surbaissement	Nombre	Portée	de tête	intermédiaires
en béton	1886-87	*Marbach*	IV-45	32m (entre rotules)	1/10.32	3	1m00	0m80	0m50
en béton	1889	*Baiersbronn*	IV-48	33 (entre rotules)	1/10	3	1.07	0.80	0.50
en béton	1893	*Munderkingen*	IV-55	50 (entre rotules)	1/10	1 (4 étages)	0.90	1.00	0.60
métallique	1904	Wengern	III-207	59	1/9.10	2	1.99	0.60	0.50

53. — Viaduc à deux étages du Point du Jour à Paris : dans la région centrale de l'étage inférieur qui porte le viaduc de Ceinture, on a augmenté l'épaisseur des voûtes.

ÉVIDEMENTS DANS LES DEUX SENS

Traversons par des évidements transversaux des évidements longitudinaux. On n'aura plus que des voûtes sur arcades [54], des voûtes d'arête [55] (f_{18}) ou une plate-forme sur des piliers [56]. On ne peut pas élégir plus : on fera ainsi quand il faut réduire le poids sur l'arche, ou le poids total sur les fondations.



Toute la charge est concentrée sous les piliers.

Sur 153 ponts ayant des voûtes de 40m et plus, on en a ainsi évidé 15 : 7 à évidements cachés, 8 à évidements apparents [55, 56].

54. — Pont des Andelys, sur la Seine (1872-73). Ellipses de 34m à 1/3.86. 2 voûtes longitudinales de 1m35 ; murs de tête de 1m27 et intermédiaire de 1m, traverses, au-dessous des naissances, par 5 voûtes de 2m10, sur piles de 0m70.

Pont du Saulnier (III, p. 40).

55, 56. ÉVIDEMENTS DANS LES DEUX SENS AU-DESSUS DE VOÛTES ⩾ 40m :

Les voûtes articulées sont en italique.

	Voûtes ou plate forme et piliers en :	Dates	Ponts : *Tous sont sous route*		Voir Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée	Grandes voûtes: Surbaissement	Portée des évidemts: en long	Portée des évidemts: en travers	Épaisseur: de la plate-forme	Épaisseur des piliers: en long	Épaisseur des piliers: en travers
			1° Évidements cachés									
55.	Maçonnerie	1873-74	Claix * (France)		III-36	52m	1/6.46	1m50	1m50	»	0m80	0m80
56.	Béton	1900-01	*Prince-Régent*	Allemagne	IV 239	63 (entre rotules)	1/9.69	1.18	»	0.25	0.52 **	0.52 **
		1901-02	*Max-Joseph*	Allemagne	IV 242	60 (entre rotules)	1/10	2.53 à 3m	2.20	0.10	0.90	0.70
		1902-03	*Reichenbach*	Allemagne	IV 183	41 (entre rotules)	1/10	»	1.00	0.25	»	0.50
		1904-05	*Wittelsbach*	Allemagne	IV 199	41 (entre rotules)	1/10	1.00	1.50	0.25	0.50	0.50
	Béton armé	1905-08	*Mannheim*	Allemagne	IV 206	58.5 (entre rotules)	1/10.6	»	»	»	»	»
		1908-09	Edmondson-Avenue, à Baltimore (Etats-Unis)		I-206	42.367	1/3.17	2.44	2.01	»	0.46	0.46
			2° Évidements apparents									
	Maçonnerie	1903-05	*Maximilien*	Allemagne	IV 192	44 (entre rotules)	1/8.98	2.10 à 2.65	1.70	0.40	0.90	0.80
	Béton	1895	*Inzigkofen*	Allemagne	IV 225	43 (entre rotules)	1/9.81	1.15 et 1.20	0.68	0.30	0.60	0.70
		1899-1900	*Neckarhausen*	Allemagne	IV 232	50 (entre rotules)	1/11	1.07, 1.20, 1.31	0.73	0.32	0.52	0.60
		1903-05	*Neckargartach*	Allemagne	IV 186	40 (entre rotules)	1/9.11	»	1.30	0.35	0.60	0.60
	Béton armé	1904-05	*Wallstrasse*	Allemagne	IV 113	57 (entre rotules)	1/9.83	2.55	1.26 et 1.36	0.16	0.3, 0.45	0.3, 0.5
		1908-11	Seytheneх (France)		III-177	41.19	1/1.10	2.22 (2 étages)	2.40	0.12	0.25	0.20
		1909-11	Longuich	Allemagne	III-279	46	1/7.16	2.30	1.15	0.20	0.40	0.10
		1911-12	*Gräveneck*	Allemagne	IV-213	48.125	1/6.25	2.35	1.29	0.15	0.25, 0.3	0.25

* Tirants entre tympans. ** Piliers en maçonnerie.

CHAPITRE VII

EMPLOI DU BÉTON ARMÉ [57]

Il est simple et pratique de placer la chaussée sur un hourdis en béton armé, porté par des murs [58] ou des piliers apparents ou cachés [57].

Le hourdis est léger, ne pousse pas les murs de tympans, se prête bien aux encorbellements.

On y ménage facilement des joints de dilatation, utiles sur les grandes voûtes plates, nécessaires sur les voûtes articulées.

Quand on emploie le béton armé, il faut adopter des plates-bandes [59], et renoncer à rappeler des voûtes [58].

Φ_{11} — Passage supérieur de la gare de Port-de-Bouc — avril 1914



57. — Voir renvoi 56.

58. — Guggersbach III, p. 59.

59. — Sur la ligne de Miramas à l'Estaque, nous avons construit deux passages supérieurs de 25^{m}60 (Φ_{11}) et 36^{m}30 (arcs en béton non armé à 3 articulations en pierre, tympans et tablier en béton armé). (Voir tableau, p. 25 - A).

TITRE VII

COMMENT ON RÉDUIT LA LARGEUR DES VOÛTES ENTRE TÊTES

UN SEUL ANNEAU AVEC TROTTOIRS EN ENCORBELLEMENT PLANCHER SUR DEUX ANNEAUX MINCES

CHAPITRE I

POUR ÉPUISER LA RÉSISTANCE DES VOÛTES, IL FAUT EN RÉDUIRE LA LARGEUR

§ 1. — *DANS UN GRAND PONT EN PIERRE, AVEC LES DISPOSITIONS HABITUELLES, LES MATÉRIAUX NE TRAVAILLENT GUÈRE QU'À SE PORTER EUX-MÊMES, ET ILS NE TRAVAILLENT PAS ASSEZ*

Art. 1. — Conditions à réaliser pour réduire au minimum le cube des matériaux d'un grand pont en pierre.

Un pont est uniquement fait pour les surcharges mobiles, — véhicules et piétons, — qui passeront dessus. Il ne travaille utilement que du fait de ces surcharges. Il faut donc que le travail de ses matériaux soit produit surtout par elles, et non par le poids mort.

Il faut, ensuite, qu'en chaque point ce travail total soit le maximum que permettent la résistance des pierres à l'écrasement, leur préparation (c'est-à-dire la taille des lits et joints), le mortier employé (chaux ou ciment).

Or, dans les grands ponts en pierre, on ne peut remplir ni l'une ni l'autre de ces deux conditions.

Art. 2. — Les charges roulantes comptent peu dans le travail total des maçonneries d'un grand ouvrage en pierre. — Dans l'effort total qu'on demande à la maçonnerie, ces charges, *en vue desquelles, encore une fois, le pont est uniquement fait,* comptent très peu [1].

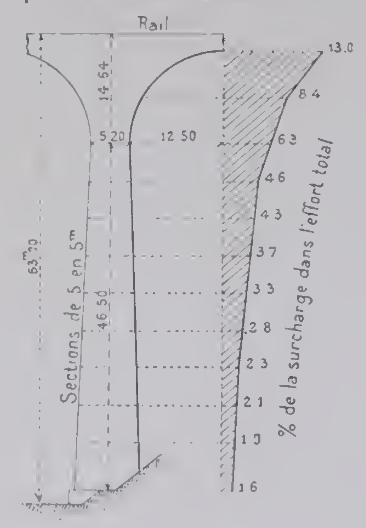
1. — Voici, pour divers ouvrages, leur part dans le travail total des maçonneries :

	Portée	Surbaissement	Part % de la surcharge roulante * dans l'effort total					
			Ponts-route 0m35 à 0m45 d'épaisseur au-dessus de la clef. Surcharge roulante de 100k par mq.			Ponts de chemin de fer 0m95 à 1m d'épaisseur sur la clef. Surcharge roulante de 1.000 à 1.100 k. par mètre carré.		
			à la clef	au plan horizontal des naissances	sur le sol de fondation (sous une pile)	à la clef	au plan horizontal des naissances	sur le sol de fondation (sous une pile)
Viaducs en plein cintre	5m	1/2	14 %	10 %	4 %	23 %	17 %	9 %
	20m	1/2	8	4	1,5	16	8	3
	25m	1/2	6	3	1	13	6	1,6
Ponts en ellipse	20m	1/4	9,5	4,5	2,5	21	12	5,3
	36m	1/3,6	6	3,4	2	13	7,5	4,6
	41m	1/4,5	7	5	4	14,5	11	8
	46m	1/4,2	6	4	3	14	11	8
Ponts en arc	16m8	1/6	9	8	4	17	13	8
	31m	1/7	9	8	4	16	14	9
	40m	1/8	7	5	3	13	10	7
	61m5	1/2,24	»	»	»	12	»	1,8 sous la culée

* Dans tous ces ouvrages, on n'a pas appliqué les mêmes règles pour la détermination des épaisseurs ; les profondeurs de fondation et les densités des matériaux sont fort inégales. Ils ne sont pas rigoureusement comparables

Leur part % dans le travail total est sensiblement moindre dans un pont-route que dans un pont de chemin de fer.

f_1 – Viaduc de la Crueize[2] – 1mm



La part d'une même surcharge est d'autant plus faible qu'il y a plus de maçonnerie intéressée : dans un ouvrage, elle va donc en diminuant de la clef aux fondations, à mesure qu'on s'abaisse sous la plate-forme (f_1).

Pour une même portée, elle est plus grande dans une voûte plate que dans un plein cintre qui a plus de maçonnerie pour une même projection horizontale.

Pour deux ouvrages semblables, elle diminue avec la portée.

Dans tous les cas, elle compte très peu dans le travail total, c'est-à-dire que *dans un grand ouvrage en pierre, les voûtes, les piles, ne travaillent guère qu'à se porter elles-mêmes, et les maçonneries en sont d'autant plus mal utilisées que la portée et la hauteur sont plus grandes.*

§ 2. — *AVEC LES DISPOSITIONS USUELLES, ON NE PEUT PAS IMPOSER AUX GRANDES VOÛTES TOUT L'EFFORT QU'ELLES PEUVENT SUPPORTER. — IL FAUT RÉDUIRE LEUR LARGEUR*

En réduisant les épaisseurs, on n'augmente pas à son gré les pressions dans les voûtes[3].

Le travail n'y dépasse 40k que dans les très grandes voûtes[4] : il est de 69k à Plauen (arc de 90m au 1/5), dans les conditions les plus défavorables de surcharge et de température[5].

Ainsi donc, avec les épaisseurs pratiques, et sauf les cas de portée et surbaissement exceptionnels, on ne peut pas faire travailler une bonne voûte aux 70k, 80k qu'elle peut supporter[6].

Pour y arriver, il faut la charger, c'est-à-dire en réduire la largeur :

soit en faisant déborder les trottoirs sur une voûte unique de largeur réduite ;

soit en plaçant la voie sur un plancher porté par deux minces anneaux.

2. — Ligne de Marvejols à Neussargues. 3. — Tome III, p. 341.

4. — 50k à Montanges (arc de 80m29 au 1/4) (III, p. 62) ; 51k à Salcano (arc de 85m à 1/3,9) (III, p. 141) ; 56k à Morbegno (arc de 70m à 1/7) (IV, p. 65) ; 83k dans un plein cintre de 157m (M. Résal, *Ponts en maçonnerie*, Tome I, p. 224).

5. — III, p. 54. 6. — Titre I, p. 22. Art. 3.

CHAPITRE II

UN SEUL ANNEAU AVEC TROTTOIRS EN ENCORBELLEMENT

§ 1. — *CE QUI A ÉTÉ FAIT SUR LES VOÛTES DE 40m ET PLUS*

Types d'encorbellement		Dates	Ponts [7]	Voir Monographie Tome,... p.	Largeur entre parapets $\mathcal{L}$	Largeur entre tympans l	Economie de largeur $\mathcal{L} - l$	Encorbellement de chaque côté $\frac{\mathcal{L} - l}{2}$	Parapets en :
Ponts-route									
Plinthe en saillie		1895	Inzigkofen	IV, 225	3m80	3m60	0m20	0m10	Métal
		1903-05	Maximilien	IV, 192	22.00	21.80	0.20	0.10	Pierre de taille ajourée
Plinthe sur sous-plinthe		1886	Elyria (2 sous-plinthes	III, 46	7.925	6.096	1.829	0.914	Métal
		1903-04	Mehring	III, 252	6.50	6.30	0.20	0.10	
		1905-06	Schweich	III. 268	7.00	6.60	0.49	0.20	
		1907-08	Trittenheim	III, 276	6.50	6.10	0.40	0.20	
Corbeaux ou Consoles	en pierre de taille	1860-61	St-Sauveur	I, 27	6.20	4.90	1.30	0.65	Métal
		1882	Teinach	III, 203	6.20	5.60	0.60	0.30	
		1885	Höfen	IV, 41	3.90	3.40	0.50	0.25	
		1886-87	Marbach	IV, 45	6.20	5.60	0.60	0.30	
		1889	Baiersbronn	IV, 48	6.60	5.81	0.79	0.395	
		1889	Huzenbach	III, 206	3.80	3.00	0.80	0.40	
		1900-01	Prince-Régent	IV, 239	17.20	17.00	0.20	0.10	Pierre de taille ajourée
		1902-04	Londres	I, 147	19.82	17.07	2.75	1.375	
		1903-05	Plauen	III, 52	17.00	16.00	1.00	0.50	Métal
		1903-05	Neckargartach	IV, 186	10.80	10.40	0.40	0.20	Pierre de taille
		1906-07	Elise	IV, 151	8.90	8.70	0.20	0.10	Pierre de taille ajourée
		1908-09	Montanges	III, 62	6.20	5.45	0.75	0.375	Métal
	en béton	1893	Munderkingen	IV, 55	8.00	7.40	0.60	0.30	Métal
		1899-1900	Brent	I, 31	8.20	7.25	0.95	0.475	
		1899-1901	Malling	IV. 175	6.00	5.72	0.28	0.14	
		1899-1908	Connecticut	I, 67	15.545	»		»	
		1899-1900	Neckarhausen	IV, 232	5.50	4.80	0.70	0.35	
	en béton arm	1901-05	Wallstrasse	IV, 143	10.00	8.80	1.20	0.60	Béton armé
		»	Gross-Kunzendorf	III, 267	8.30	7.20	1.10	0.55	Métal
		1906	Guggersbach	III, 59	5.00	3.90	1.10	0.55	
		1907	Schwusen	III, 213	5.00	4.60	0.40	0.20	
		1908	Seythenex	III, 177	3.80	2.80	1.00	0.50	
		1909-11	Longuich	III, 279	4.60	4.10	0.50	0.25	
		1911-12	Gräveneck	IV, 213	5.70	5.00	0.70	0.35	
Plate-forme en métal posée sur les tympans		1904	Wengern	III, 207	7.00	5.50	1.50	0.75	Métal
Ponts sous chemin de fer									
Plinthe sur sous-plinthe		1890	Pouch	III, 110	8.90	8.30	0.60	0.30	Métal
		1890-91	Freyssinet	III, 112	8.25	7.65	0.60	0.30	
Modillons		1877-78	Calcio	III, 100	8.00	7.50	0.50	0.25	
Corbeaux ou Consoles	en pierre de taille	1871-72	Signac	I, 131	4.50	4.20	0.30	0.15	
		1899-1900	Gutach	III, 122	5.00	4.20	0.80	0.40	
		1899-1900	Schwändeholzdobel	III, 126	5.20	4.40	0.80	0.40	
		1901-02	Solis	I, 55	4.00	3.70	0.30	0.15	
		1901-05	Schalchgraben	II, 168	5.00	4.50	0.50	0.25	
		1904-05	Steyrling	III, 137	4.75	4.50	0.25	0.125	
		1907-08	Escot	II, 171		3.87			
		1907-09	Langenbrand	III, 152	4.70	4.20	0.50	0.25	
	en béton	1903-04	Illerbeuren	IV, 159	4.60	4.00	0.60	0.30	
		1906	Kempten Ponts à 4 voies	IV, 115	16.75	16.00	0.75	0.375	
			Kempten Ponts à 2 voies		8.25	7.50	0.75	0.375	
		1907-08	Garching	IV, 95	4.60	3.80	0.80	0.40	
		1907-09	Wiesen	I, 235	4.00	3.70	0.30	0.15	
	en métal	1905-06	Verdon	I, 133	5.58	4.85	0.73	1 passerelle en encorbt de 0.855	
Plate-forme en métal posée sur les tympans		1901-02	Chemnitz	III, 129	»	2.70			

7. — Voir aussi les ponts en béton un peu armé de Spokane, III, p. 293, Boberullersdorf, III, p. 298.

§ 2. — *QUELQUES TYPES D'ENCORBELLEMENTS*

Jusqu'ici, on a pratiqué les encorbellements surtout pour élargir les anciens ponts [8].

Ils sont fort à conseiller dans les ponts neufs pour supporter les trottoirs [9] où ne passent que des piétons.

On gagne beaucoup et on couronne agréablement un pont par de grands corbeaux en pierre de taille portant des dalles [10], des voûtes en briques [11] (Φ_1).

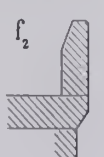
Φ_1 — Hôtel d'Assezat à Toulouse (XVI[e] siècle) — octobre 1911



Le béton armé, hourdis et grandes consoles, est là très spécialement indiqué [12, 13].

Sauf dans les ponts de ville, où ont paru parfois s'imposer des parapets en pierre, on ne met en encorbellement que des garde-corps en métal, plus légers, plus minces. Ils gagnent déjà 30 à 35^{cm} sur la largeur du pont [14].

f_2

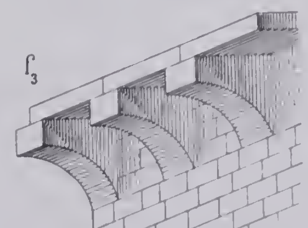


8. — Pont de Jurancon sur le Gave de Pau (Φ_8, p. 109),...

9. — A un pont d'Andrinople, le parapet s'appuie sur une corniche en surplomb ; il est, pour moins encombrer, taillé en biseau (f_2) (Choisy, *Histoire de l'Architecture*, Tome II, p. 132).

10. — Pont de Londres, I. p. 150, 151 ; — Arènes d'Arles (f_3) (Choisy, *Art de bâtir chez les Romains*, Pl. XVI, fig. 3) ; — Murs latéraux des églises romanes d'Auvergne,...

f_3



11. — Pont de Cazères sur la Garonne (Croizettes-Desnoyers, *Construction des Ponts*, Tome II, p. 132).

12. — Au viaduc de Saint-Florent (Ligne de Saint-Florent à Issoudun), on a posé une voie de chemin de fer départemental à côte des deux voies normales, en mettant les parapets en porte-à-faux de 1^{m}38, sur des consoles en beton arme ancrees dans les tympans (1907).

Pour pouvoir installer une nouvelle voie sur le pont sur l'Isle, en gare de Coutras, on a mis le garde-corps en encorbellement de 2^{m}25, sur consoles en béton armé, et placé le rail extérieur à 10^{cm} en arrière du tympan (1908).

13. — Pont de Corbeil, (Annales des Ponts et Chaussées, 1907, IV, p. 89, - M. Lorieux).

14. — APPENDICE, - Viaducs.

Il ne faut pas avoir peur des encorbellements : il y en a de célèbres exemples [15].

§ 3. — *RÉDUCTION DE LARGEUR POUR LES VOÛTES SOUS RAILS*

On a réduit la largeur des grandes voûtes :

sous une voie normale : à 3m80 [16, 17] au lieu de 4m50 ;

sous deux voies normales : à 7m50 [18] au lieu de 8m ;

sous une voie étroite : à 3m70 [19] au lieu de 4m.

Au pont de Fontpédrouse [20], on a obtenu la largeur de 4m14 en plaçant une dalle en béton armé sur des voûtes larges, au sommet, de 2m50 seulement.

Plus l'ouvrage est haut, plus on gagne de cube [21].

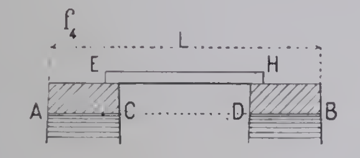
CHAPITRE III

VOIE LARGE SUR DEUX ANNEAUX MINCES PORTANT UN PLANCHER

§ 1. — *DESCRIPTION SOMMAIRE*

Art. 1. — Principe du système. — Soit à établir un ouvrage d'une largeur L (f_4).

Au lieu d'une voûte continue AB, construisons deux ouvrages indépendants AC, DB, et jetons sur le vide CD, un plancher EH en béton armé, en métal [22, 23].



Art. 2. — Son économie. — Nous réalisons ainsi les deux conditions pour réduire au minimum le cube des matériaux de l'ouvrage (Chap. I, - Art. 1), conditions irréalisables avec la voûte pleine AB :

on augmente très sensiblement la part % de la surcharge dans le travail total ;

en concentrant les charges sur les voûtes de largeur réduite AC, BD, on y augmente, à volonté, le travail par unité.

Une charge au milieu est portée, non par un anneau de voûte de grande ouverture, mais par un plancher léger de petite portée.


Φ_2 — octobre 1908



15. — Au Vieux Palais de Florence (Φ_2), sur les corbeaux du couronnement, s'élève une tour dont le couronnement est aussi sur corbeaux.

16. — Garching (IV, p. 95).

17. — Le pont de Chemnitz (III, p. 129) aurait 2m70 entre têtes pour une seule voie normale.

18. — Calcio (III, p. 100). Kempten (IV, p. 115).

19. — Solis (I, p. 55), Wiesen (I, p. 235).

20. — Voir plus loin, Titre XI.

21. — APPENDICE, - Viaducs,

22. — Cela revient, au fond, à traiter un pont comme une maison. Pour une maison, on construit d'abord les gros murs : on les fonde avec soin, on y met les matériaux chers. On y ménage les fenêtres, les portes : ce sont les deux ponts jumeaux avec leurs grandes voûtes et leurs voûtes d'évidement. Puis, on les couvre d'un plancher léger calculé pour les surcharges qu'il peut avoir à supporter, qu'on peut remplacer par parties, par feuilles. C'est le plancher en béton armé, en poutrelles avec briques,...

23. — C'est, comme dans les voûtes « gothiques », une coque légère sur deux nervures.

Le plancher transporte toutes les charges verticales sur les anneaux de tête ; ceux-ci les transforment en poussées et les conduisent aux culées extrêmes qui les absorbent. Les poussées ne sont plus dispersées sur toute la largeur du pont : elles sont concentrées sur celle des anneaux [24].

On supprime tous les matériaux mal utilisés de l'intervalle CD ; on les remplace par un plancher qui, lui, travaille partout au maximum permis. On supprime, en particulier, les matériaux de voûte, qui sont chers.

On supprime le cintre, dont le prix augmente avec le carré de la portée.

Art. 3. — Avantages divers. — Les deux ouvrages, étant indépendants, peuvent être fondés à des niveaux fort différents, avantage sensible si le rocher se rencontre ainsi, — tandis que, pour une grande arche unique, il faut un appui continu, sans ressaut [25].

S'il y a des mouvements inégaux à chaque tête (tassement, dilatation), pas de tendance à fissures, les voûtes étant indépendantes.

La deuxième voûte peut être faite sur le cintre de la première, transporté ou réemployé [26] : on a très facilement ripé de très grands cintres.

La première voûte sert de pont de service pour la deuxième.

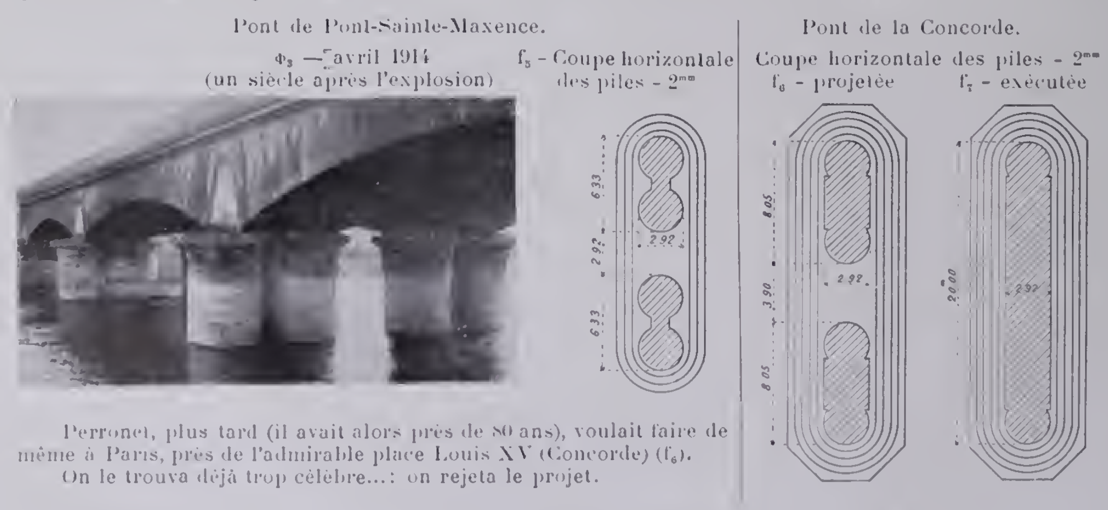
Dans l'intervalle entre les deux voûtes, on fera, si l'aspect ne le défend pas, passer l'égout, les conduites d'eau, de gaz, les fils de télégraphe, de téléphone.

Il n'y a en béton armé, en métal,... que le plancher qui, seul, travaille à la flexion, partie accessoire, facile à réparer.

Les autres parties, qui, toutes, travaillent à la compression, — les essentielles : fondations, piles, culées, voûtes, — sont en maçonnerie.

24. — De même, tandis que sur toute leur longueur, les voûtes romanes poussent un mur plein, les nervures « gothiques », dégagées de la masse de la voûte, localisent la poussée sur les arcs-boutants.

25. — Au pont de Pont-Sainte-Maxence, sur l'Oise (1771-86), Perronet posa 3 arcs de 23m40 surbaissés à 1/11,2 sur 2 piles faites chacune de 2 groupes de 2 colonnes (Φ_3, f_5), de 2m92 de diamètre, écartés de 2m92. C'était hardi ; ç'a été solide : le 1er avril 1814, on fit sauter la première voûte rive gauche : il n'en resta qu'un arc de 2m40 de largeur ; les deux autres arches restèrent debout.



Perronet, plus tard (il avait alors près de 80 ans), voulait faire de même à Paris, près de l'admirable place Louis XV (Concorde) (f_6).
On le trouva déjà trop célèbre...: on rejeta le projet.

26. — Peut-être a-t-on ainsi construit le pont du Gard qui est en arceaux accolés.

Art. 1. — Pont Adolphe à Luxembourg. — Cette très économique disposition a d'abord été appliquée au pont Adolphe à Luxembourg, de 16^m de largeur entre parapets, en deux anneaux de 5^{m}25 écartés de 6^m.

Art. 2. — Pont des Amidonniers. — On a fait mieux, ensuite, à Toulouse[27].

Les nervures prolongées du plancher sous chaussée débordent les tympans et portent les garde-corps et les trottoirs. Cet auvent en porte-à-faux fait comme un encastrement à l'appui des nervures et soulage leur milieu.

Φ_4 — Pont de Romans — mai 1908



On a donné à la circulation une largeur disponible de 22^m sur deux anneaux ayant ensemble 6^{m}50.

On tire ainsi le meilleur parti du système.

Art. 3. — Autres ponts en deux anneaux. — Le système inauguré à Luxembourg a été appliqué à Constantine, aux trois ponts américains de Walnut Lane, Rocky River et Spokane qui sont, vraiment, une réplique de Luxembourg ; — à quelques autres : pont de Romans sur l'Isère (Φ_4)[27 bis]...

J'ai réuni au tableau ci-après ce qui les concerne.

27. — Aux ponts romains du Gard, de Sommières, plus tard au pont d'Avignon, (Voir p. 40, Φ_{12}), les voussoirs des grandes voûtes forment des anneaux accolés sans liaison : ces anneaux, on peut les écarter et les recouvrir de dalles.

On a fait ainsi au pont romain d'El Kantara, à l'entrée du Sahara, sur la route de Biskra (Choisy, Tome I, p. 517 ; — Annales des Ponts et Chaussées, 1912, III, p. 478, M. Boisnier), et, au Moyen-Age au pont d'Airvault sur le Thouet (Φ_5).

Φ_5 — Pont d'Airvault — juin 1908



On croit inventer : on retrouve.

PONTS EN DEUX ANNEAUX [28, 29] Pour le sens des symboles A. E. r[te], f[r], voir Préliminaires, p. 3	Largeur entre parapets Σ	Largeur des anneaux à la clef l_a	Largeur du vide entre eux l_v	Intrados aux fondations ou aux naissances Portée $2a$ Surbaissement	Intrados Portée libre $2a'$	Épaisseur de la voûte à la clef ou retombées	Rapports % $\frac{l_a}{\Sigma}$	Rapports % $\frac{l_a}{2a}$	Rapports % $\frac{l_a}{2a'}$	Comment sont réunis les deux ouvrages aux culées extrêmes	Tablier En quoi il est fait *Dispositif pour la dilatation* Tous ces croquis sont à 1/1000	Cintres Type *Matériaux* Le 2e cintre ripé ou remonté sous la 2e voûte	Dépense totale D par m. q. de surface utile (D : S_p) [30] par m. c. de volume « utile » (D : W) [31]
Adolphe, sur la Pétrusse, à **Luxembourg** 1899-1903 $\widehat{A^1}\widehat{A^1}$ r[te] (> 40m)[1] (II, p. 67)	16m	*5m33*	5m92	84m65 1/2.73	72m	1m44 *2.16*	33	6.2	7.3	Au-dessus du sol par une voûte à axe vertical	Béton armé. *Les entretoises sont posées sur feuilles de plomb.*	Retroussé sur 56m30 *Sapin* Ripé	D = 1548456f D : S_p = 469f D : W = 19f6
des **Amidonniers,** sur la Garonne, à **Toulouse** (France, - *Haute-Garonne*) Pont 1903-07 / Dalle 1910-11 $E^{II}E^{II}$ r[te] (> 40m)[1] (I, p. 193)	22	*3.25*	10	46 (1/4.17) 42 (1/4.10) 38.50 (1/4.08)	44.36 40.24 36.68	1.26 / *1.98* 1.21 / *1.98* 1.18 / *1.91*	14	7	7.3	Au-dessus du sol par une voûte à axe vertical	Béton armé. *Les entretoises portent sur des sommiers en pierre de taille par des balanciers en béton armé.*	Fixes *Sapin* On a construit en même temps les deux voûtes jumelles	D = 1145714f D : S_p = 202f5 D : W = 13f5
par-dessus la gare d'eau **Branla** (IV, p. 269) près de Lyon (France, - *Rhône*) 1906; $\widehat{A^1}\widehat{A^1}$ r[te]; *Projet et Travaux* : M. Tavernier, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.	4	*0.60*	1.964	25 1/10	»	0.30 Aux reins 0m60 environ	15	2.4	»	Culée unique pour les 2 anneaux	Béton armé. Les arcs sont réunis par une dalle de 10cm en béton armé posée sur l'extrados.		D = 13000f entre culées D : S_p = 130f D : W = 15f9
sur l'Isère, à **Romans** (France, - *Drôme*) 1906-08 $\widehat{A^3}\widehat{A^3}$ (r[te] et f[r]) *Projet et Travaux* : M. Clerc, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.	10	*2.50*	3.20	Voûte R G 34 (1/2.57) Voûte centr. 33 (1/2.73) Voûte R D 32 (1/2.92)	29 28.80 28.40	1.05 *3 env.*	25	7.3 7.6 7.8	8.6 8.6 8.7	Par une voûte en ellipse surhaussée	Fer, béton, briques.	Fixe Retroussés sur 26m / 32m *Bois* Remontés	D = 268217f D : S_p = 183f7 D : W = 14f9
de **Walnut Lane,** sur le Wissahickon Creek, à **Philadelphie** (États-Unis, - *Pennsylvanie*) 1906-08 $\widehat{A^1}\widehat{A^1}$ r[te] (> 40m)[2] (II, p. 83)	17.07	*5.19*	4.88	71.02 1/3.32	70.74	1.68 *2.90*	32	7.7	7.7	Les pilastres des grandes voûtes sont réunis par une voûte en béton armé. Les 2 grandes voûtes sont sur une même fondation	Poutres métalliques enrobées dans du béton faisant corps avec celui des tympans. *Tablier coupé au droit des petites piles.*	Fixe *Bois et Métal* Ripé	D = 1830000f D : S_p = 601f2 D : W = 21f2
de **Samoëns,** sur le Giffre (France, - *Haute-Savoie*) (*Biais à 65°*) 1907-08 $\overline{A^1}\overline{A^1}$ r[te] *Projet et Travaux* : M. Schoendoerffer, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.	6	*1.50*	2	21 1/7	»	0.60 *0.90*	25	7.1	»	Fondation commune aux deux voûtes	Béton armé.	Fixe *Bois* Remonté	D = 27600f D : S_p = 131f4 D : W = 26f1
du **Creux,** sur l'Aumance (France, - *Allier*) 1908-09 E^3E^3 r[te] *Projet et Travaux* : M. Ferrieu, Ingénieur des Ponts et Chaussées.	6	2	2.40	Voûte centr. 16.30 (1/3.26) Voûtes de rive 15.70 (1/3.20)	15.45 15	0.70 *1.09*	30	12.2	12.9		Béton armé.	Fixe *Bois* Remonté	D = 40170f D : S_p = 106f9 D : W = 17f7
sur la **Rocky River,** près de **Cleveland** (États-Unis, - *Ohio*) 1908-10 $\widehat{A^1}\widehat{A^1}$ r[te] (> 40m)[3] (II, p. 95)	17.07	*5.19*	4.88	85.34 1/2.46	»	1.83 *3.35*	32	6.4	»	Fondation commune aux deux voûtes	Entre les 2 ponts, poutres enrobées ; au-dessus, béton armé de barres rondes. *Tablier coupé tous les 15m24.*	Retroussé sur 85m34 *Acier* Ripé	»
Sidi-Rached, sur le Rhummel, à **Constantine** (Algérie) 1908-12 $\widehat{A^1}\widehat{A^1}$ r[te] (> 40m)[4] (II, p. 107)	12	*1.12*	3.92	68.76 1/2.76	67.57	1.50 *2.85 et 2.93*	34	5.9	6.1	— id. —		Retroussé sur 56m *Sapin* On a fait 2 cintres	D = 1830000f D : S_p = 341f1 D : W = 13f4

Projet et Travaux : M. Bonnet, Ingénieur en

§ 3. — *FAIRE EN DEUX ANNEAUX LES PONTS LARGES*

Art. 1. — Ce qu'enseigne le tableau précédent.

A. Épaisseur des anneaux. — Malgré l'augmentation du travail, on n'a pas augmenté à Luxembourg ni à Toulouse, l'épaisseur à la clef des formules usuelles.

B. Rapport à la portée libre de la largeur d'un anneau.

Cette largeur est :

7,3 % de la portée libre, à Luxembourg, aux Amidonniers ;

6 % de la portée totale, à Luxembourg.

Elle a suffi : au décintrement des deux voûtes de Luxembourg, des dix voûtes des Amidonniers, les appareils disposés aux têtes n'ont accusé aucune tendance au flambement.

Art. 2. — Economie. — Par rapport à un pont « plein », l'économie a été d'environ : 250.000 f à Luxembourg, soit 16 % ; 300.000 f aux Amidonniers, soit 26 % [33].

Art. 3. — Faire en deux anneaux les ponts larges. — Un pont est fait pour la circulation. Ce qui sert, c'est la largeur entre parapets, trop souvent insuffisante dans les ponts de ville [34, 35] : ce qui coûte, ce sont les maçonneries mal utilisées des fondations, des piles et des voûtes.

Plaçons donc une très large chaussée sur de très minces anneaux dont on aura réduit la largeur et l'épaisseur à juste ce qu'il faut pour ne craindre ni écrasement, ni flambement transversal.

Si on demande à la maçonnerie de ces anneaux tout l'effort qu'elle peut supporter sans danger, si on peut ne rien sacrifier pour l'aspect, on arrivera à une économie qu'aucun autre système ne paraît, en l'état, pouvoir donner [36].

Les premiers ponts ainsi faits pourront sembler élargis après coup. Mais on s'y fera. L'idée est juste : on trouvera, — peut-être a-t-on trouvé, — des formes que l'œil accepte.

33. — I, p. 207.

34. — Au XVIIIe siècle, on a donné souvent aux grands ponts 45 pieds (14^{m}75) entre parapets (Orléans, Tours, Concorde,....) : c'est devenu tout-à-fait insuffisant à la Concorde.

Dans une grande ville, il faut au moins 16^m, mieux 20^m, 22^m. — Le pont d'Austerlitz a été élargi de 12^{m}74 (1805) à 18^m (1854), puis à 29^{m}80 (1884). Le pont au Change a 30^m, le pont Alexandre III, 40^m, le pont de Charlottenbourg à Berlin, 55^m (Génie Civil, 26 juin 1909).

f_8 $\mathcal{L}$ — l L l

35. — On règle L (f_8) suivant ce qui passera dessus : voitures, tramway, chemin de fer d'intérêt local ; l, suivant le nombre de piétons.

Comme première indication, on peut admettre que les trottoirs doivent laisser passer autant de piétons de 0^{m}75 que la chaussée de voitures de 2^{m}50 : $\frac{l}{L} = \frac{0.75}{2.50} = 0{,}3$. 1/3 est bon pour l'aspect ; à moins de 1/4, le trottoir est maigre.

36. — Voici, pour quelques ponts, ce qu'a coûté le m.q. de surface offerte à la circulation :

11 ponts en maçonnerie construits à Paris de 1806 à 1866 ont coûté de 304 f (Austerlitz, 1854), à 578 f (Petit Pont, 1853), les 2 autres, 746 f (Pont National, 1853), 752 f (Pont au Double, 1847). — Morandière, *Construction des Ponts*, Tome I, p. 340).

Les ponts récents à grands arcs d'acier ont coûté : Pont Mirabeau, à Paris (1893-95), 594 f ; Pont Alexandre III, à Paris (1897-1900), 1120 f ; Ponts sur le Rhône à Lyon : La Fayette (1888-90), 623 f ; Morand (1888-90), 678 f ; Université (1905), 441 f ; Pont de Rouen, 889 f.

Les trois derniers ponts en maçonnerie construits sur la Garonne (sous chemin de fer à 1 voie) ont coûté au m.q. : pont de Port-Sainte-Marie, 612 f ; de Marmande (1877-81), 695 f ; de Belleperche (1895-1900), 312 f.

Aux Amidonniers, — pont de luxe, — le m.q. de surface offerte à la circulation, ne coûte que 202 (I, p. 207).

TITRE VIII

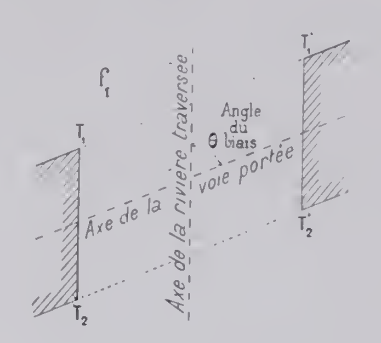
PONTS BIAIS

CHAPITRE I

VOÛTES BIAISES

§ 1. — *DÉFINITIONS*

Art. 1. — Berceau biais. — Un berceau est biais quand ses têtes $T_1 T'_1$, $T_2 T'_2$, ne sont pas perpendiculaires au plan vertical des génératrices de la douelle (f_1).



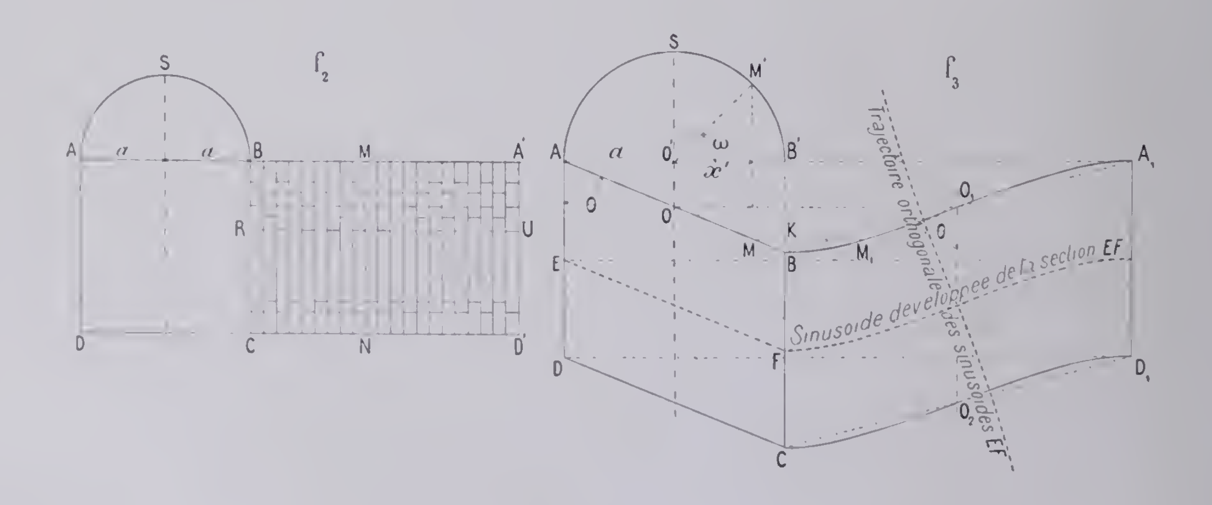
Art. 2. — Angle du biais. — Le biais est l'angle aigu θ[1] que fait l'axe de l'ouvrage avec celui de la voie ou de la rivière traversée (f_1).

Art. 3. — Développement de la douelle. — Deux systèmes de lignes orthogonales. — Considérons un berceau droit (f_2). Fendons-le suivant AD et développons la douelle autour de BC.

Sur le développement, on voit deux systèmes de lignes à angle droit :

des joints discontinus parallèles aux têtes, tels que RU ;

des lignes continues d'assises, — ou lits, — telles que MN, génératrices du berceau, perpendiculaires aux têtes.



1. — Quand la voûte est droite, $\theta = 90°$. Il eût été plus rationnel de mesurer le biais par son complément θ' ; la difficulté du biais eut cru avec θ'.

De même, soit un berceau biais de section droite ASB' (f_2) : fendons-le suivant AD et développons-le autour de BC.

On tracera sur la douelle développée, deux systèmes de lignes à angle droit :

les sinusoïdes, développements [2] des têtes et des sections parallèles aux têtes : ce seront les lignes des joints discontinus ;

les trajectoires orthogonales de ces sinusoïdes : ce seront les lits continus [3].

§ 2. — *APPAREILS BIAIS* [4]

Art. 1. — Appareil orthogonal parallèle.

— Sur la douelle développée, on trace les sinusoïdes (développements des sections parallèles aux têtes), leurs trajectoires orthogonales ; puis on les relève horizontalement et verticalement [5].

2. — Un point quelconque M de la tête vient en M_1 (f_3), tel que :

$$KM_1 = x_1 = \text{arc } B'M'$$
$$BK = y_1 = \frac{MK}{\operatorname{tg} \theta} = \frac{(a - x')}{\operatorname{tg} \theta}.$$

Comme les arcs se conservent en développement, la courbe BO_1A_1 est inclinée sur les génératrices, de θ en O_1.

Si c'est une voûte complète (plein cintre, ellipse), elle leur est normale en B et A_1.

Si ASB' est un plein cintre de rayon a,

$$x_1 = a\omega$$
$$y_1 = \frac{a(1 - \cos\omega)}{\operatorname{tg} \theta}$$

tangente en $M_1 = \frac{dy_1}{dx_1} = \frac{\sin\omega}{\operatorname{tg}\theta}$. On la construit facilement.

3. — $X_1 = x_1 = a\omega$ $\quad \frac{dY_1}{dX_1} = -\frac{dx_1}{dy_1} = -\frac{\operatorname{tg}\theta}{\sin\omega}$ $\quad dY_1 = -\frac{\operatorname{tg}\theta\, a\, d\omega}{\sin\omega}$.

$$Y_1 = -a \operatorname{tg}\theta\ L \operatorname{tg}\frac{\omega}{2} + \text{constante}.$$

Toutes ces trajectoires sont les mêmes. On en construit une, puis on en découpe un patron.

Φ_1 – Pont de Rimini [4 bis]



4. — Déjà le pont de Rimini est appareillé biais (Φ_1).

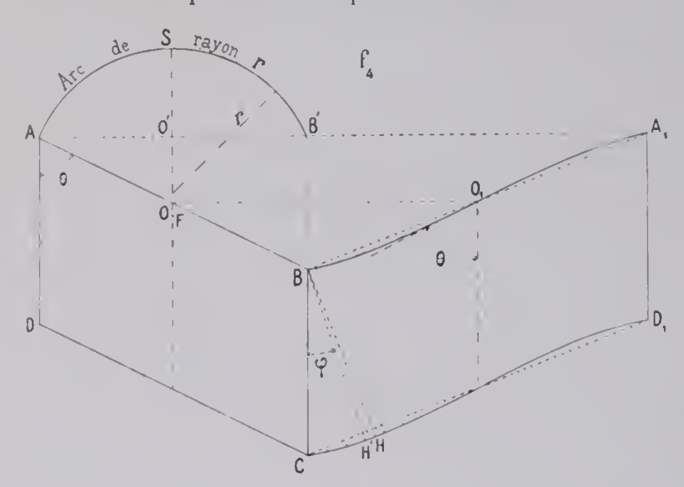
4bis. — Date de la photographie : septembre 1908.

5. — Je renvoie, pour les appareils et les épures, aux Cours de Stéréotomie et à la fort copieuse littérature des voûtes biaises : on y doit tout spécialement distinguer l'excellent Traité : « *Appareil et Construction des ponts biais* » de Graeff (alors Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées), Paris, Dunod, 1867.

Art. 2. — Appareil héliçoïdal. — Divisons en parties égales les deux arcs de tête. Menons la normale BH à la corde $BO_1 A_1$. Prenons le point de division le plus voisin H' et joignons BH'

Aux trajectoires orthogonales des sinusoïdes parallèles $BO_1 A_1$, substituons les parallèles à BH'.

Elles en diffèrent d'autant moins que la corde est plus voisine de l'arc $BO_1 A_1$, c'est-à-dire que l'arc est plus surbaissé.

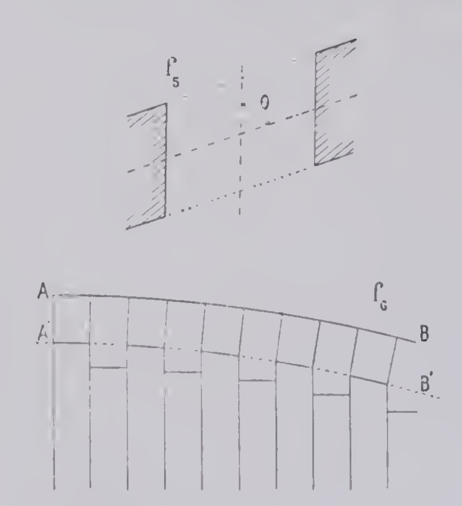


Ces droites font avec les génératrices l'angle « intradossal rectifié » φ : elles s'enroulent sur la douelle en décrivant des hélices de pas $\frac{2\pi r}{\text{tg}\,\varphi}$, d'où le nom de l'appareil.

Tous les joints dans le plan de tête passent par un même « foyer » F tel que :

$$SF = r\left(1 + \frac{\text{tg}\,\varphi}{\text{tg}\,\theta}\right)$$

§ 3. — *CHOIX DE L'APPAREIL SUIVANT LE BIAIS* (f_5).



Art. 1. — θ > 80°. — On appareille comme si la voûte était droite.

Art. 2. — θ entre 70° et 80°. — Soient AB, A'B' les sinusoïdes, développements de l'intrados du bandeau, et de la courbe des queues des voussoirs courts.

Ils sont appareillés normalement à ces deux courbes : les longs, au-delà de la queue des courts, sont retournés suivant les génératrices.

La douelle est celle d'une voûte droite[6].

Art. 3. — θ entre 60° et 70°. — On emploiera l'appareil « héliçoïdal » quel que soit l'intrados. On trace les lits et joints sur le platelage du cintre en pliant dessus une règle flexible.

Sauf aux têtes, les matériaux de douelle sont rectangulaires (moellons, briques[7]).

6. — Viaduc de l'Epau (Ligne de Tours à Vendôme) : portée = 10m10 ; θ = 70°. Nous avons fait ainsi des passages supérieurs, des têtes de souterrains.

7. — Dès l'origine des chemins de fer, en Angleterre, pays de briques, on a employé l'appareil héliçoïdal.

Art. 4. — θ entre 50° et 60°. — On adoptera quand on le pourra des arcs surbaissés, et alors l'appareil héliçoïdal, lequel diffère peu de l'appareil théorique près de la clef, et de plus en plus à mesure qu'on s'en éloigne.

Si un plein cintre ou une ellipse s'impose, et que l'aspect n'importe pas, on acceptera la construction de Léveillé[8], lequel limite l'appareil héliçoïdal au cerveau de la voûte, et appareille les reins en voûte droite : avec ses joints ainsi brisés, il se rapproche de l'appareil théorique à la clef et aux naissances. Il y a aux reins une file de crossettes motivées seulement pour des yeux avertis.

Mais si l'aspect importe, il faudra bien pour les pleins cintres et les ellipses, en venir à l' « appareil orthogonal parallèle ». Il est cher, de projet laborieux, d'exécution délicate, et laid[9], même bien exécuté[10].

Art. 5. — θ < 50°. — Les appareils biais ne sont plus pratiques. Si on ne peut pas découper l'ouvrage en arcs droits indépendants, on fera un pont métallique ou en béton armé.

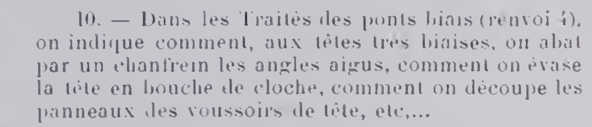
§ 4. — *TRÈS LONGUES VOÛTES BIAISES*

Les traités des Ponts biais indiquent les dispositions à adopter pour n'appareiller en biais que les abords des têtes dans les longues voûtes biaises (ouvrages sous grands remblais, têtes de souterrains....) : appareil orthogonal convergent, difficile et cher ; — héliçoïdal, qui l'est un peu moins ; — appareil Léveillé modifié[11].

§ 5. — *PORTÉE LIMITE DES VOÛTES A APPAREIL BIAIS*

Une des plus grandes paraît être celle de Tavignano en Corse (ligne de Bastia à Corte)[12,13] biaise à 53°, — têtes en ellipse de 30ᵐ au 1/4, — appareil orthogonal parallèle.

8. — Elle est indiquée à l'APPENDICE, — ouvrages de 8ᵐ d'ouverture et au-dessous.

9. — J'ai le droit, comme auteur du projet (1877), de qualifier ainsi le pont de Becdejeu (Φ_2) sur le Lot

(Ligne de Mende à Sévérac), 4 arches en plein cintre de 16ᵐ, biaises à 54°, en appareil orthogonal parallèle.

Φ_2 Pont de Becdejeu.



10. — Dans les Traités des ponts biais (renvoi 4), on indique comment, aux têtes très biaises, on abat par un chanfrein les angles aigus, comment on évase la tête en bouche de cloche, comment on découpe les panneaux des voussoirs de tête, etc,...

11. — Annales des Ponts et Chaussées, décembre 1879, p. 339. « *Simplification pratique de l'appareil orthogonal convergent. Application au pont souterrain des Kouis* ». M. A. Picard, Ingénieur des Ponts et Chaussees.

12. — Annales des Ponts et Chaussées. Décembre 1882, p. 578. « *Appareil orthogonal dans les voûtes biaises dont la section droite est une ellipse surbaissée* » — par M. Sampité, Ingénieur des Ponts et Chaussées. (Pont de Tavignano p. 587, Pl. 32).

13. — La voûte de 40ᵐ de Pont-sur-Yonne (I, p. 213) est biaise à 70° ; celle de 47ᵐ50 du pont Elise (IV, p. 151) à 81°20'; celle de 50ᵐ du pont de Munderkingen (IV, p. 55) à 75° : elles sont toutes en béton.

§ 6. — *PRÉCAUTIONS DANS L'EXÉCUTION DES VOÛTES BIAISES*

Art. 1. — Cintres. — Les cintres des voûtes biaises doivent être exceptionnellement rigides ; il faut éviter les cintres retroussés, sauf pour les petites ouvertures, et contreventer à outrance.

Pour un ouvrage très long, on déviera les plans des fermes à partir de chaque tête, de façon à les orienter au plus tôt suivant la section droite de la voûte.

Les fermes doivent être reliées par des entretoises biaises, c'est-à-dire parallèles aux génératrices de la voûte, et par des entretoises droites ou des tirants perpendiculaires aux plans des têtes [14].

Il est bon de clouer sur les couchis un platelage sur lequel on trace les lits de douelle.

Art. 2. — Maçonnerie des voûtes. — On maçonnera les voûtes en bon mortier de ciment; on les laissera très longtemps sur cintre pour réduire les tassements, très dangereux pour elles [15].

§ 7. — *OBSERVATIONS DIVERSES*

Art. 1. — Pas de voûtes d'évidement apparentes au-dessus des voûtes biaises. — Il faut bien se garder de traverser les tympans des voûtes biaises par des voûtes apparentes, droites ou biaises.

Elles y font assez mauvais effet, et il y a, pour les accrocher sur les grandes voûtes, des appareils fort compliqués.

Art. 2. — Ne pas craindre, ne pas rechercher les voûtes biaises. — Les voûtes biaises sont chères, assez désagréables, même bien faites. Il convient de les éviter, mais sans payer trop cher un redressement du tracé.

Il ne faut pas en avoir peur, mais encore moins les rechercher par amour du compliqué.

§ 8. — *PILES BIAISES SOUS VOÛTES BIAISES*
TRACÉ DES BECS

Art. 1. — Bec en ellipse. — On peut adopter une ellipse rapportée à Ox, Oy', directions conjuguées (f_7) :

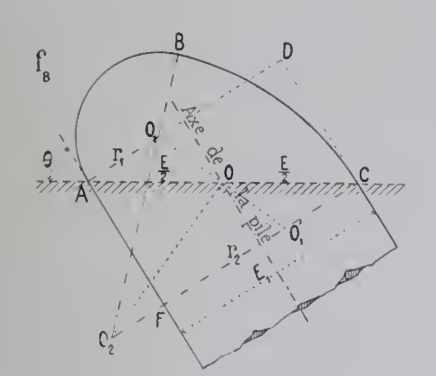
$$\frac{x^2}{\left(\frac{E}{2}\right)^2} + \frac{y'^2}{\left(\alpha \frac{E}{2}\right)^2} = 1$$

Pour $\alpha = 1$ $\quad OB = OA = OC$

On l'effilera un peu avec $\alpha = \frac{1}{\sin \theta}$: (c'est déplacer de M' en M chaque point de la 1/2 circonférence AB'C) (f_7).

14. — Annales des Ponts et Chaussées, 1er trimestre 1905, p. 63. M. Thérel : Deux passages supérieurs biais de la Corniche de l'Estérel, entre Fréjus et Cannes, par-dessus la ligne de Marseille à Nice ; voûtes construites sur cintre retroussé, par rouleaux, joints secs ; bandeaux reliés à la douelle par des feuillards ; dépense 113f, 137f par m. q. de surface couverte.

15. — Le pont par-dessus la rue d'Alésia à Paris (Ligne de Paris à Sceaux) a été si éprouvé au décintrement qu'il a fallu le reconstruire. On y aurait pu prendre la précaution, autrefois recommandée, de relier les têtes par des tirants en fer.



Art. 2. — Bec en anse de panier à deux rayons r_1 r_2. — C'est moins simple.

Les centres sont sur AD et CF (f_8).

Je prends $CO'_1 = AO_1 = r_1$. Je joins $O_1O'_1$ qui passe par le milieu O de AC, et j'élève en O la perpendiculaire OO_2 à $O_1O'_1$.

O_2 est le 2e centre, O_2C le 2e rayon r_2.

r_1 a été pris arbitrairement. On peut s'imposer une deuxième condition : par exemple celle-ci, la plus usitée : OA = OC = OB (f_9)[16], ou une autre[17].

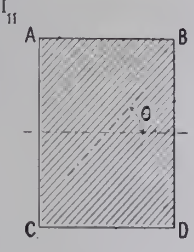
CHAPITRE II

VOÛTES DROITES
DONT L'AXE EST OBLIQUE SUR LA RIVIÈRE OU LA VOIE TRAVERSÉE

Art. 1. — Ouvrages à une seule arche. — En augmentant la portée on peut, par une voûte droite, franchir obliquement une rivière : il y en a maints exemples[18].

Art. 2. — Ouvrages à plusieurs arches. Voûtes droites sur piles biaises. — La coupe horizontale d'une pile aux naissances est un rectangle dont les côtés sont :

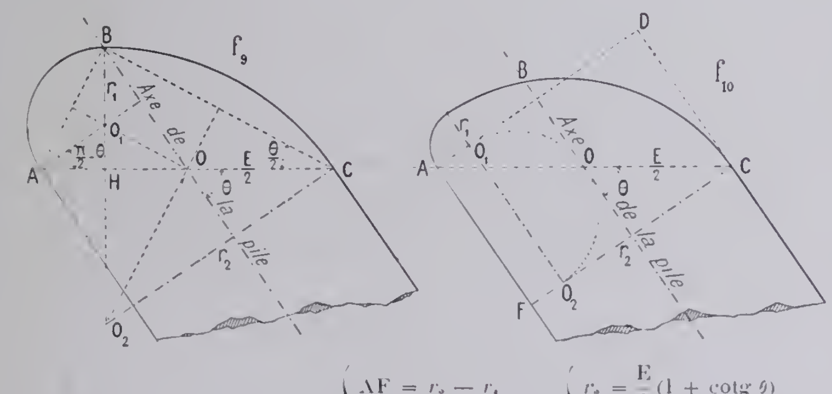




AB l'épaisseur aux naissances ;

AC la largeur de la voûte.

Ce rectangle assure la stabilité de la voûte, mais non l'écoulement des eaux.



16. — Les centres sont les points de rencontre des hauteurs dans les deux triangles isocèles ABO, OBC (f_9) :

$$r_1 = \frac{E}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \qquad r_2 = \frac{E}{2} \operatorname{cotg} \frac{\theta}{2}$$

17. — La différence $r_2 - r_1 = O_1O_2$ (f_{10}) (longueur interceptée entre AD et CF) est minima pour O_1O_2 perpendiculaire à AD, c'est-à-dire parallèle à l'axe de la pile. On a (f_{10}) :

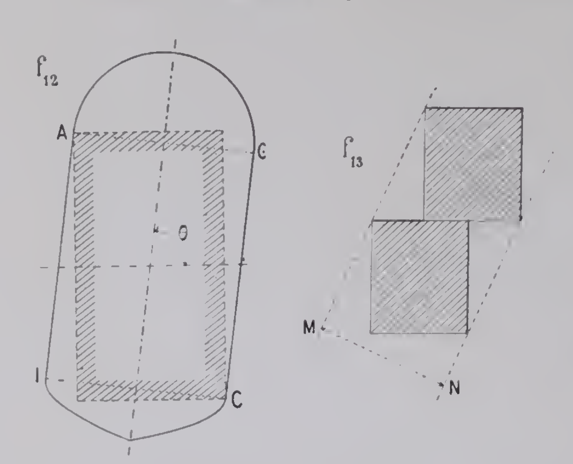
$$\left\{ \begin{array}{l} AF = r_2 - r_1 \\ E = r_2 + r_1 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{l} r_2 = \frac{E}{2}(1 + \operatorname{cotg} \theta) \\ r_1 = \frac{E}{2}(1 - \operatorname{cotg} \theta) \end{array} \right.$$

La courbe est fort aplatie aux reins : elle peut convenir à un arrière-bec.

18. — Castelet (II, p. 130), Escot (II, p. 174), Gour-Noir (III, p. 103), Pouch (III, p. 110), Freyssinet (III, p. 112), Jaremcze (III, p. 114), Diveria (III, p. 130),...

Si le pont est droit, il suffit d'ajouter des becs.

S'il est biais, enveloppons le rectangle « nécessaire » par un polygone, par une courbe, de façon à avoir la moindre surface (par économie), le moindre encombrement de la rivière.



On tracera l'enveloppe au mieux suivant le biais, la largeur du pont, l'épaisseur de la pile.

Au besoin, on aplatira l'arrière-bec[19].

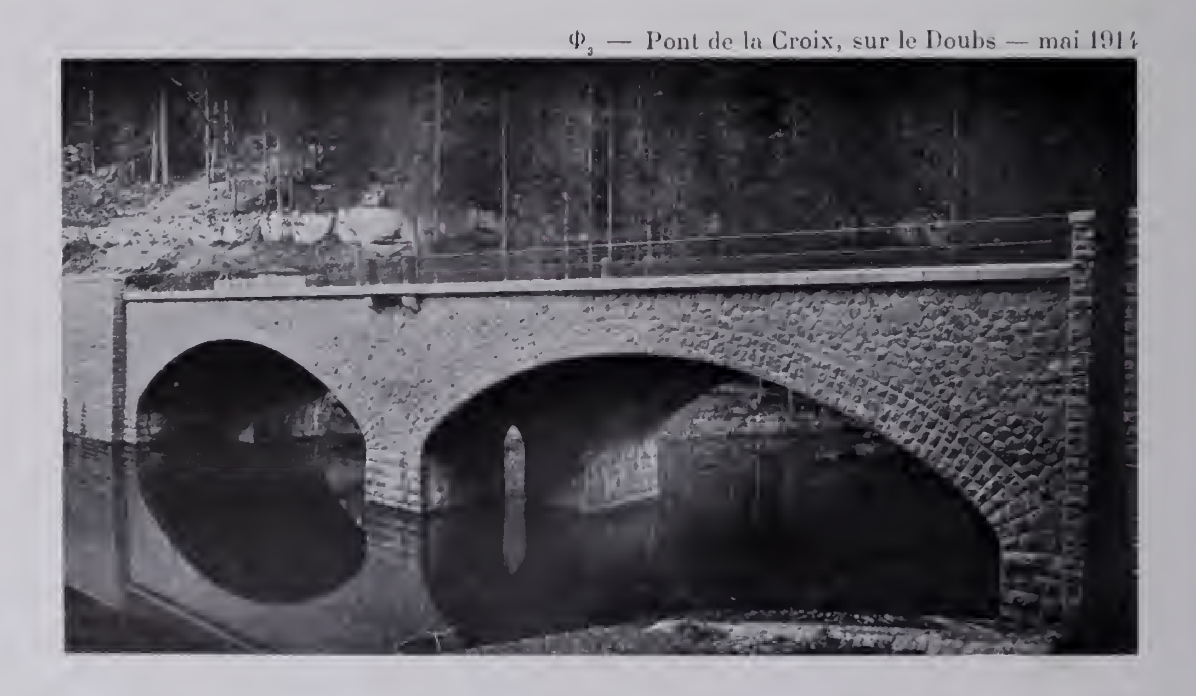
Pour les faibles biais ($\theta < 80°$), on acceptera le rectangle AGCI et deux becs (f_{12}).

Avec deux arcs décrochés (f_{13}), on réduit l'enveloppe et l'encombrement.

Nous avons fait le pont de la Croix sur le Doubs (Ligne de Frasne à Vallorbe), biais à 45°, en deux voûtes droites de 4^m de largeur, déplacées l'une par rapport à l'autre de 4^{m}206 (Φ_3)[19bis].

Elles reposent sur une pile rectangulaire sans bec qui fait sur l'eau l'effet d'un avant-bec à 90°[20].

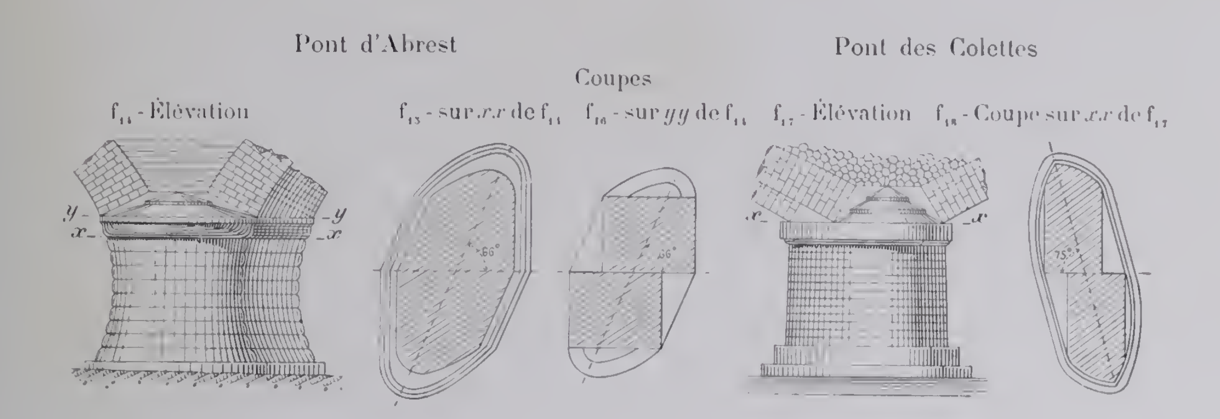
Φ_3 — Pont de la Croix, sur le Doubs — mai 1914



19. — Canale (III, p. 185). 19bis. — Portée : 20^m ; montées : 4^{m}374 et 4^{m}350.

20. — Les becs sont à 90° : au pont du Vieux-Château, à Vérone (III, p. 173) ; au vieux pont de Toulouse (1542-1632) : il a aujourd'hui plus de 300 ans : il a résisté à quantité d'inondations, en particulier à celle de juin 1875, qui a emporté nombre de ponts plus jeunes ; au pont d'Ornaisons (1750-1760) (I, p. 63) ; au pont de la Big-Muddy River (I, p. 225) ; à un pont sur la Delaware (III, p. 289)......

Voici ce que nous faisons (f_{11} à f_{16}) au pont d'Abrest[21], biais à 66°, 7 ellipses de 33m surbaissées à 1/3,63 :



et ce que nous ferons (f_{17}, f_{18}) au pont des Colettes[22], biais à 75°, 4 arcs de 23m à 1/7,5.

Dans ces ponts, les 2 anneaux accolés ne sont pas reliés : ils ne se contrarieront pas au décintrement.

Art. 3. — Voûte en arcs droits minces.

— On peut découper une voûte biaise, non plus seulement en deux, mais en autant d'anneaux que l'on veut, soit accolés, soit séparés[23,24].

Les arcs doivent être assez larges pour ne pas flamber.

Ils ont beaucoup de parement et d'appareil.

Art. 4. — Ouvrages courants sous remblais, droits, à plinthe rampante.

On les adoptera toutes les fois que la hauteur le permettra[25].

Φ4



21. — sur l'Allier (Ligne de Riom à Vichy).

22. — sur la Sioule (Ligne de La Ferté-Hauterive à Gannat).

23. — Pont d'Albi sur le Tarn, biais à 74°, 5 pleins-cintres de 27m60 en 5 anneaux de 1m714, espacés de 0m857. — Pont de Tounis, sur un bras de la Garonne à Toulouse, biais à 45°, — arc de 24m au 1/6 en 9 anneaux de 1m espacés de 0m80.

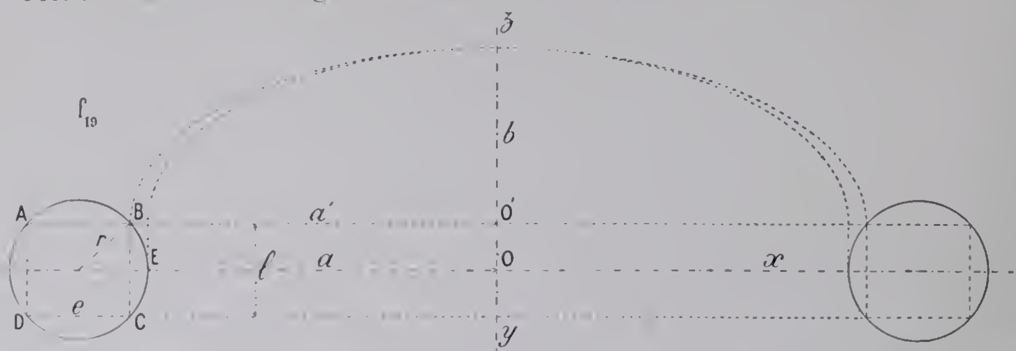
24. — Passage supérieur de la gare de Mende (Φ4), biais à 42°, en 5 anneaux de 24m70 à 21m40 de portée*, 3m048 de montée, larges de 1m575, espacés de 1m19.
*Les 2 culées ne sont pas parallèles.

25. — Voir Appendice.

CHAPITRE III

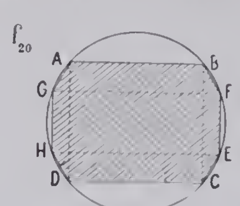
VOÛTES DROITES, NON EN BERCEAU, SUR PILES RONDES

Soit ABCD le « rectangle nécessaire »[26]. Traçons le cercle circonscrit.



Engendrons la douelle par une courbe (ellipse, arc,...) de montée constante et de portée croissante, de OE à O'B[27,28].

Soit par exemple, une voûte de 36^m d'ouverture, sous chemin de fer à 1 voie, c'est-à-dire de 4^m50 de largeur. Donnons à la pile 1/8 de la portée, soit 4^m50. Le « rectangle nécessaire » est, ici, un carré.



Le « ventre » est $\frac{l}{2}(\sqrt{2}-1) = 0{,}207\ l$.

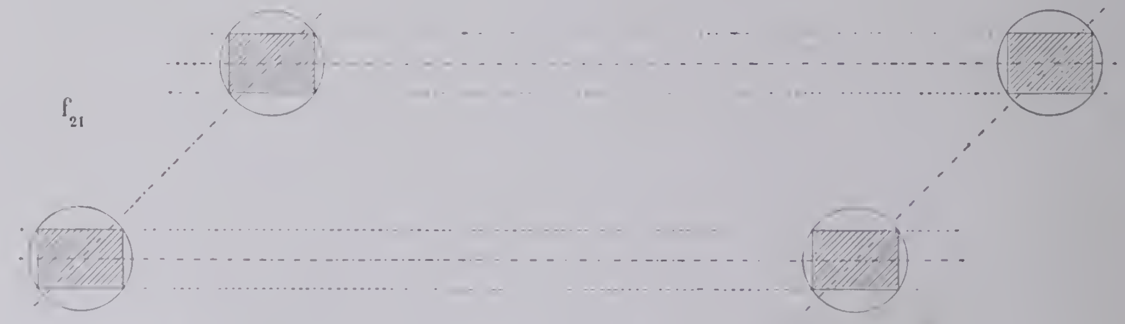
On peut accepter cette douelle ventrue pour $l \leqslant e$.

On pourrait aussi conserver la voûte en berceau sur la bande GHFE (f_{20}), et échancrer les têtes par les voussures BF, EC.

CHAPITRE IV

PONTS EN DEUX ANNEAUX

Si le pont des Amidonniers eut été biais, on eût pu faire ceci (f_{21}) :



Il y a là, pour les larges ponts biais, des solutions intéressantes.

26. — Chap. II, art. 2. 27. — Ponts de Maretta et de Prarolo (III, p. 95).

28. — L'équation de la douelle rapportée à Ox, Oy, Oz, est :
si la génératrice est une ellipse $(a\ b)$,

$$\left\{ \frac{b^2 x^2}{b^2 - z^2} - \left[(a + r)^2 - y^2 + r^2 \right] \right\}^2 = 4\,(a + r)^2\,(r^2 - y^2)$$

si c'est un arc de cercle,

$$\left[b \left\{ x^2 + (b - z)^2 \right\} - \left\{ (a + r)^2 + b^2 + r^2 - y^2 \right\} (b - z) \right]^2 = 4\,(r^2 - y^2)\,(a + r)^2\,(b - z)^2.$$

TITRE IX

VOÛTES EN COURBE [1]

A l'Appendice, on trouvera tout ce qui concerne les ouvrages courants et les viaducs en courbe.

Dans les grandes voûtes [2], les plinthes et les parapets sont en général en ligne droite, suivant la corde du tracé ; l'ouvrage est élargi, sur la portée $2a$, de la flèche $\frac{4a^2}{8R}$; les têtes sont planes.

Au pont de Krenngraben [3] en courbe de 320^m, du côté du centre le parapet suit le tracé : la plinthe concave est portée près des culées par des corbeaux de saillie variable.

TITRE X

PONTS EN RAMPE, EN DOS D'ÂNE

§ 1. — *PONTS EN RAMPE*

Art. 1. — Ponts sous route ; ponts sous chemin de fer. — Un ouvrage à rampe unique semble tomber vers sa culée basse.

On plie en dos d'âne les ponts-route dans les villes ; mais les ponts sous chemin de fer suivent la rampe du tracé.

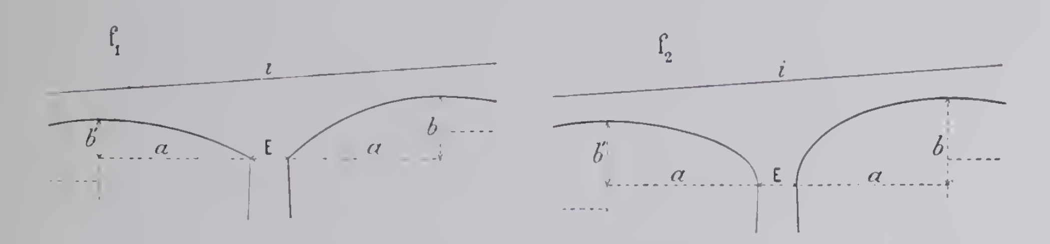
Art. 2. — Ouvrages courants. Viaducs. — Voir l'Appendice.

Art. 3. — Ouvrages bas. — L'eau, les socles des piles, font des plans horizontaux de comparaison très voisins des naissances : on les met au même niveau des deux côtés de chaque pile.

Pour les pleins cintres, voir l'Appendice, Viaducs.

Pour les arcs et les ellipses, on fait chaque voûte de deux 1/2 voûtes ayant la 1/2 ouverture, et dont les montées diffèrent de :

$$\left[2a \text{ (portée)} + E \left(\begin{matrix}\text{Épaisseur} \\ \text{de la pile}\end{matrix}\right)\right] i \text{ (rampe)}$$



1. — Le frère Joconde, de Vérone, a construit au XVIe siècle, près d'Aquino, le célèbre « *ponte Corro* » en courbe d'environ 200^m de rayon, convexe vers le courant.
Croizette-Desnoyers. « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 54 ; Pl. VI, fig. 8.

2. — Ponts à 2 voies : Maretta, Prarolo (III, p. 93) ; Pouch (III, p. 110).
Ponts à 1 voie : Castelet (II, p. 130), Schwändeholzdobel (III, p. 126), Krenngraben (III, p. 134), Salcano (III, p. 141)

3. — III, p. 134.

Art. 4. — Tracé des grandes voûtes en rampe. — La 1/2 voûte la plus haute est la plus chargée : la courbe de pression s'y rapproche de l'extrados.

On l'a, quelquefois, plus cambrée [1, 2], plus élégie [2].

Art. 5. — Intrados des voûtes en très forte rampe (sous un escalier, sous un chemin de fer à crémaillère, sous un funiculaire). — On peut adopter une ellipse rampante [3], dont la ligne des naissances soit inclinée suivant la pente et son diamètre conjugué vertical [4], ou une courbe composée d'un arc de parabole et d'un arc de cercle...

§ 2. — *PONTS EN DOS D'ÂNE*

Art. 1. — Pour l'aspect, un long pont doit toujours être en dos d'âne [5]. — Si les lignes du couronnement ne sont pas convexes, elles paraîtront creuses au milieu [6, 7].

Φ — Vieux Pont d'Orléans — (1751-1760) [7bis]



Un ouvrage en dos d'âne a un milieu et deux extrémités : il fait un tout.

1. — Munderkingen (IV, p. 55), rampe de 30^{mm} ; Illerbeuren (IV, p. 159), rampe de $22^{mm}5$.

2. — Ramonnails (II, p. 186), rampe de 59^{mm}.

3. — Dans un pont, un viaduc en pente, les génératrices de douelle demeurent horizontales ; dans un pont sous remblai, dans un souterrain en pente, elles sont inclinées sur l'horizon, la voûte est en pente ; quand les naissances d'une voûte en berceau sont à des niveaux différents, elle est « rampante ».

4. — Amidonniers (I, p. 193), arches sous l'escalier des culées.

5. — Les ponts de Paris, de Lyon, d'Orléans, de Blois, de Toulouse, de Bordeaux, sont en dos d'âne.

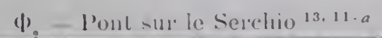
6. — Les Grecs ont courbé vers le ciel l'entablement, le dallage du Parthénon : l'œil les voit horizontaux.

7. — Le pont de Tours est en palier : c'est fâcheux.

7bis. — Voir Tome III, p. 258, renvoi 8. — Date de la photographie : août 1905.

Quand les deux rives sont à des niveaux différents, on force la pente à partir de la rive haute pour avoir un point haut au milieu [8].

Les deux rampes ne sont pas nécessairement égales : elles sont à la demande des quais [9].


Φ_2 — Pont sur le Serchio [13, 14-a]



Dans les longs ponts, pour l'aspect comme pour la circulation, il ne faut pas un dos d'âne à trop grandes pentes [10, 11] ; 1cm fait très bien (Φ_1) [12].

Mais dans les courts, surtout dans les ponts à une arche, l'œil accepte de très fortes rampes (Φ_2, Φ_3, Φ_4).

Ponts à Venise [14 b]

Φ_3



Φ_4



Art. 2. — Intrados des ponts en dos d'âne. — L'œil rapporte tout au plan de l'eau. On place les naissances au même niveau, non plus seulement de part et d'autre de chaque pile, mais toutes.

8. — Pont de Luxembourg (11, p. 68, n° 2).

9. — Le pont au Change est en rampes de 10 et 20mm ; le pont Saint-Michel, de 15 et 6mm ; le nouveau pont d'Orléans, de 10 et 4mm.

10. — Les rampes sont de : 17mm au pont de l'Alma, 20mm aux ponts Mirabeau et Alexandre III, 24mm au pont des Invalides, 26mm au pont du Midi sur le Rhône à Lyon.

11. — Pont de Blois (Φ_1, p. 32), en pente et rampe de 49mm ; pont de Toulouse (Φ_5, p. 84), en déclivités de 22mm7 et 40mm4 ; le sommet est trop haut au-dessus des quais.

12. — Vieux pont d'Orléans, 8 lignes par toise, soit 0,097 ou 1 [illegible] (Φ_1).

13. — Entre Lucques et les Bains-de-Lucques.

14. — Date des photographies : *a* - octobre 1906 ; *b* - mai 1911.

On augmente les montées, des rives à l'arche du milieu :

soit en conservant la même ouverture [14 bis] ;

soit, bien mieux, en augmentant en même temps les portées dans un rapport à étudier [15].

Les piles doivent résister à la différence des poussées : c'est dangereux si elles sont fondées sur pilotis [16].

Φ_1 — Vieux Pont de Toulouse (1542-1632) [20]



Art. 3. — Raccordement des déclivités au sommet.

— On y peut :

soit laisser les deux rampes avec leur angle (Φ_5)[17]; il s'accentue, vu de biais ;

soit les raccorder par une courbe [18, 19].

14 bis. — Exemples :	Voûtes de rive Portée	Voûtes de rive *Montée*	Voûtes centrale Portée	Voûtes centrale *Montée*	Pente en *mm*
Pont des Invalides (4 arches)	31m87	*3m338*	31m69	*4m108*	24mm
de Valence (4 arches)	49.20	*11.575*	49.20	*12.305*	34

15. Pont	Nombre d'arches	Voûtes de rive Portée	Voûtes de rive *Montée*	Voûtes centrale Portee	Voûtes centrale *Montée*	Pente en *mm*
Vieux Pont d'Orléans	9	29m88	*8m13*	32m48	*9m10*	10mm
Pont de l'Alma	3	38.50	*7.70*	43	*8.60*	»
Pont de Tolbiac	5	29	*7.09*	35	*8.18*	17
Vieux Pont de Toulouse	7	13.36	*7.68*	31.82	*12.54*	41 et 23.7
Pont de Verdun	3	38.50	*8.52*	41	*9.47*	30 et 15

16. — Accident du pont des Invalides, en 1878.

17. — Ponts du Moyen-Age : ponts de Toulouse, de Blois, d'Orléans ; — ponts de Luxembourg (II, p. 60), Plauen (III, p. 14),...

18. — Mantes (I, p. 140), Valence (I, p. 142), Édouard VII (I, p. 144), Amidonniers (I, p. 188), Orléans (III, p. 232),...

19. — Ponts Morand et La Fayette, à Lyon, en arc de cercle de 5206m de rayon, incliné à 0m02 à la rencontre des murs de quai ; — Pont du Prince-Regent (IV, p. 222).

20. — Date de la photographie : août 1903.

TITRE XI

COMMENT ON AJUSTE L'OUVRAGE AU TERRAIN

CHAPITRE I

QUELQUES SILHOUETTES D'OUVRAGES
SUR QUELQUES FORMES DE TERRAIN

§ 1. — *FAIRE LES OUVRAGES A LA DEMANDE DU TERRAIN*

Art. 1. — Indications générales. — Supposons arrêtée la place des culées, — soit d'un pont, pour laisser passer les crues, — soit d'un viaduc, à la limite pratique de la hauteur des remblais[1].

Quelles portées adopter?

C'est affaire d'espèce, de circonstances locales.

La seule règle est d'ajuster l'ouvrage aux lieux, de le faire à leur mesure.

Art. 2. — Cas où la place des piles est imposée par un ouvrage voisin. — Si deux ponts sont tout-à-fait voisins, les piles de l'un doivent, — pour la navigation et aussi pour l'écoulement des eaux, — être à peu près en prolongement des piles de l'autre[2].

Art. 3. — Nombre pair où impair d'arches. — L'œil accepte à peine quatre arches[3,4], à grand'peine deux.

Art. 4. — Comment on arrête la silhouette de l'ouvrage. — On trace sur du papier calque les élévations possibles; on les promène sur le profil en long de la traversée, pour les bien placer, assurer le passage des chemins, mettre une arche au-dessus du creux de la vallée, etc...[1]

Pour un grand ouvrage, on étudiera ses dispositions d'ensemble à temps pour modifier au besoin le tracé.

Quand le choix est restreint à un petit nombre de solutions, on étudie des projets comparatifs, d'abord en gros, puis, s'il y a doute, de près.

Les portées arrêtées, on étudie pour chaque partie toutes les variantes sur calques en retombe: c'est toujours trop tôt qu'on cesse d'étudier.

§ 2. — *OUVRAGES BAS: PONTS*

Si le lit mineur est bien défini entre des berges, des quais, des levées insubmersibles, on le franchit par un ouvrage à grandes arches à peu près égales.

1. — Voir Appendice, — Viaducs.

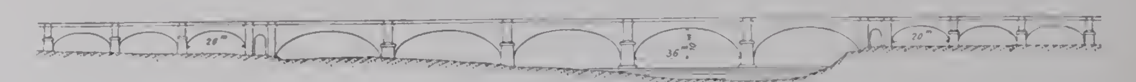
2. — A Paris, les bateaux avaient quelque difficulté à passer du pont Notre-Dame, qui avait 5 arches sous le pont au Change, qui n'en a que trois.
On vient de démolir le pont Notre-Dame.

3. — Pont des Invalides.

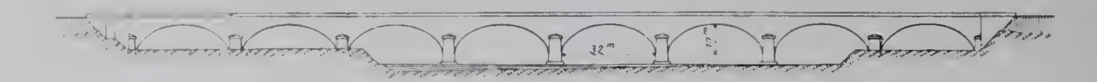
4. — Pont de Valence (I, p. 173): la pile du milieu était près et à la suite de celle d'un pont suspendu.

S'il est creusé dans une plaine submersible, on encadre l'ouvrage principal par des viaducs d'accès à plus petites arches (Pont de Marmande, f_1).

f_1 — Pont de Marmande, sur la Garonne — 0mm4



f_2 — Pont de Port-Sainte-Marie, sur la Garonne — 0mm4



C'est souvent une faute que de prolonger les grandes arches hors du lit mineur (Pont de Port-Sainte-Marie) (f_2).

Sur les creux de certaines vallées submersibles, on jette des ouvrages de décharge[5].

Des guideaux[6] entonnent l'eau sous les arches et arrêtent les courants latéraux.

On n'a réussi qu'à Gignac[7] une grande arche entre deux petites.

§ 3. — *OUVRAGES HAUTS. — VIADUCS*[8]

On franchira :

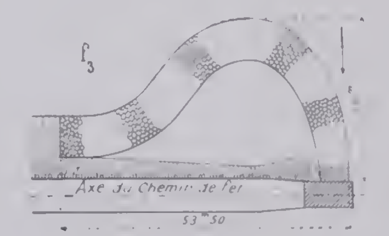
une vallée régulière, par un viaduc à arches égales ;

une vallée à pentes douces, brusquement creuse au milieu, par une grande arche ou plusieurs grandes arches au-dessus du creux, par de petites arches aux abords.

Si une vallée régulière ABCD (f_4) est coupée d'un creux profond, on jettera sur le creux une voûte CSD ; sur le sommet de la voûte, on appuiera une pile P.

Le creux est supprimé[9]. Au-dessus de AB, on n'a plus qu'un viaduc courant.

On a fait ainsi au viaduc de Fontpédrouse :



5. — On n'en a pas fait sur l'Allier.

6. — A Marmande (1881-1884) (f_3), puis à Belleperche (1895-1900), on a, pour guider le courant, épanoui le remblai : l'eau glisse sans trop affouiller. A l'amont des remblais, on plante des saules : ils créent un matelas d'eau morte qui les protège.

7. — I, p. 103.

8. — Voir : Appendice, Viaducs.

9. — SC, SD sont comme les jambes d'un homme dont le tronc est PS, ou comme les deux moitiés d'une pile unique fendue verticalement.

VIADUC DE FONTPÉDROUSE — Φ_1 — aval — Août 1908

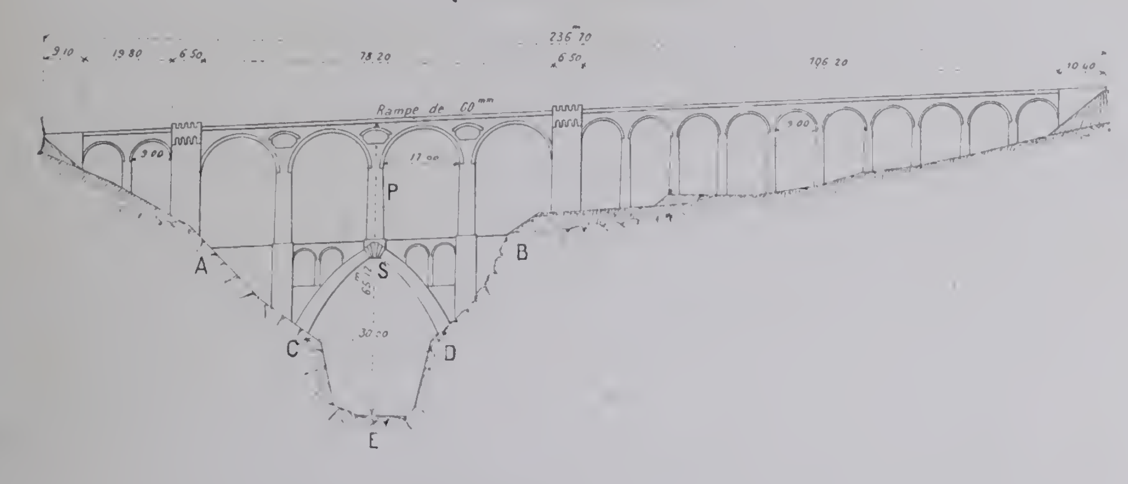


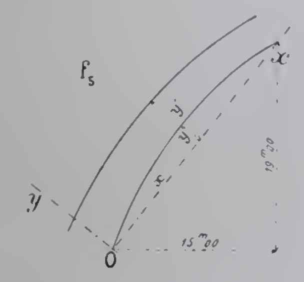
VIADUC SUR LA TÊT, PRÈS DE FONTPÉDROUSE

(PYRÉNÉES-ORIENTALES)

Ligne électrique à voie de 1ᵐ de Villefranche-de-Conflent à Bourg-Madame (1906-08)

f_4 — Élévation — 0ᵐᵐ6





1. Ogive.

Intrados : $y = 0{,}24587\,x\,[1 - 0{,}023385\,x - 0{,}000756\,x^2]$.

Extrados :

$y' = 3{,}806412\,[1 - 0{,}047199\,x - 0{,}0013736\,x^2 - 0{,}000045697\,x^3]$.

Les courbes de pression sont bien encadrées.

2. Matériaux. — Le pont est en granit.

L'ogive est, jusqu'à 4ᵐ de la clef, à mortier de chaux du Teil à 300ᵏ ; au-dessus, à mortier de ciment du Teil à 600ᵏ.

Le béton de la dalle est à 300ᵏ de ciment, 400ˡ de sable, 800ˡ de « gravillon ».

3 Pressions maxima,

en kg 0^m01^2, sous la surcharge.

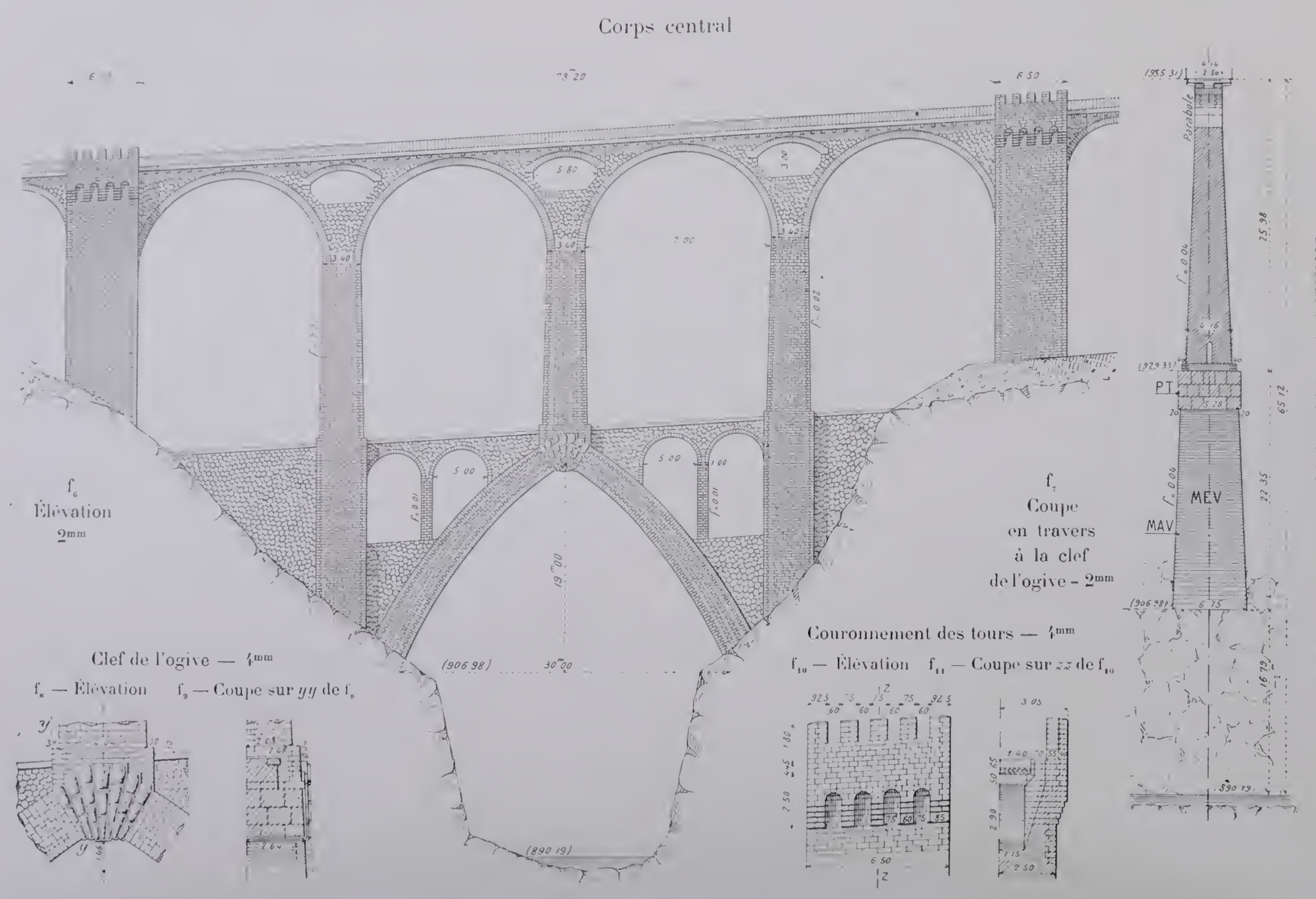
	Ogive		Voûtes de 17ᵐ 10		
				Retombée	
	Clef	Naissances	Clef	R. G.	R. D.
A la température du décintrement....	10ᵏ	12ᵏ	11ᵏ	8ᵏ	26ᵏ
A 10° au-dessus......................	17	14	31	8	11
A 10° au-dessous.....................	10	9	11	11	19

4. Dispositions en vue des variations de température. — La dalle est continue, sans coupure. Elle est ancrée dans les culées.

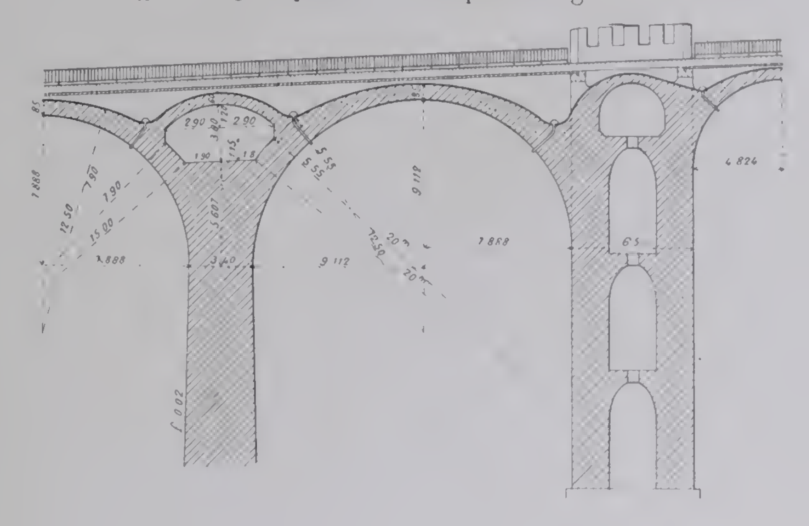
Les tympans sont chaînés par des feuillards.

En août 1911, après 3 ans, ni la dalle, ni les tympans, n'étaient fissurés.

10. D'après les tables de M. Pigeaud (Annales des Ponts et Chaussées, 1905, 2ᵉ trimestre, p. 201 et suivantes)


Corps central
f_6 Élévation 2mm
f_7 Coupe en travers à la clef de l'ogive - 2mm
Parabole
PT
MEV
MAV
Clef de l'ogive — 4mm
f_8 — Élévation f_9 — Coupe sur yy de f_8
Couronnement des tours — 4mm
f_{10} — Élévation f_{11} — Coupe sur zz de f_{10}

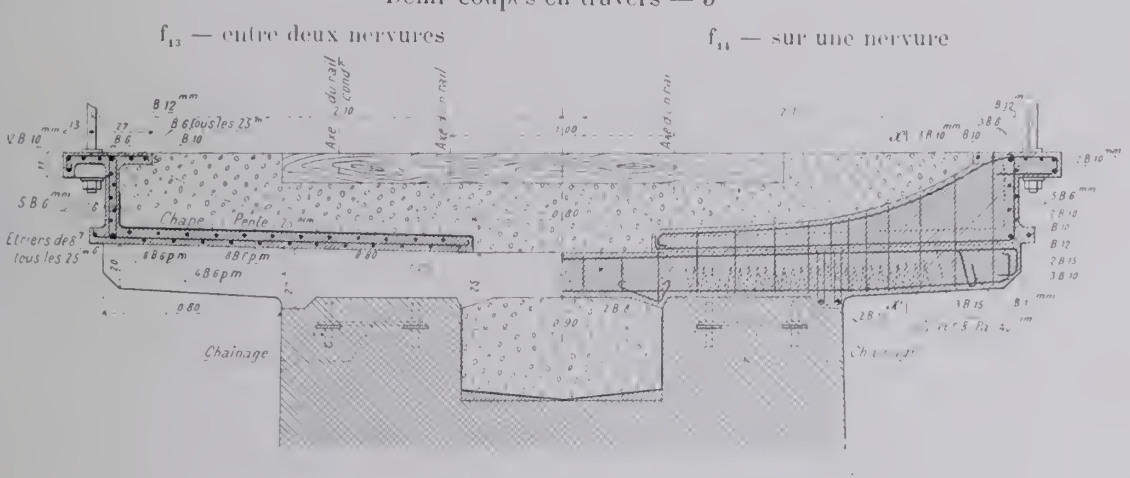
f_{12} — Étage supérieur — Coupe en long — $2^{mm}5$



Dalle en béton armé.

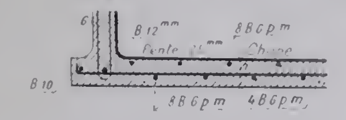
Demi-coupes en travers — 3^{cm}

f_{13} — entre deux nervures f_{14} — sur une nervure

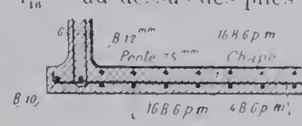


Hourdis — 5^{cm}

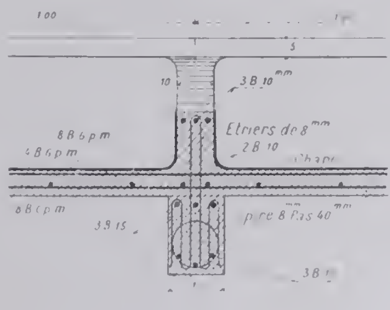
f_{15} — au-dessus du cerveau des voûtes



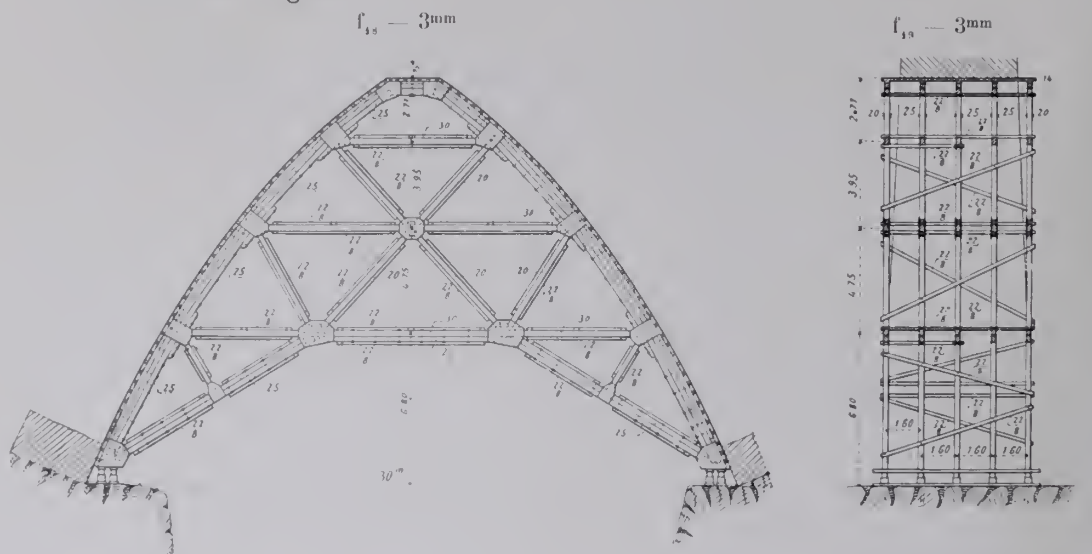
f_{16} — au-dessus des piles



f_{17} — Coupe sur xx de f_{14} — 5^{cm}



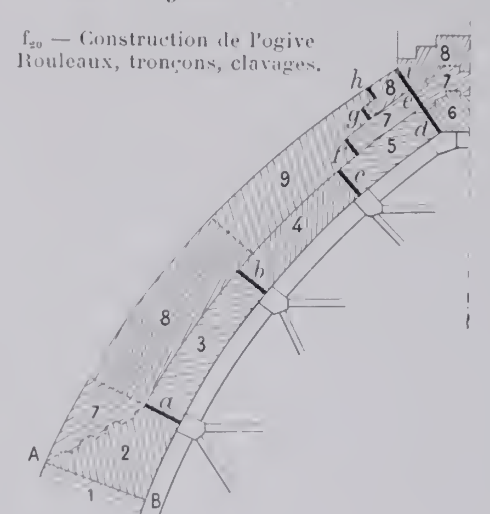
5. Cintre de l'ogive.



f_{18} — 3mm f_{19} — 3mm

6. Exécution des voûtes.

A. – Ogive. — On l'a construite à pleine épaisseur jusqu'à AB ; puis en deux rouleaux, dans l'ordre des chiffres de f_{20} : on ménageait en *a*, *b*, ... *i*, des joints secs, maintenus à l'intrados par des bandes de plomb de $25^{mm} \times 15^{mm}$, à l'extrados par des coins et barrettes en fer [11, 12] ; on les matait au mortier de ciment à l'état de terre humide :



f_{20} — Construction de l'ogive
Rouleaux, tronçons, clavages.

dans l'ordre.........	*a*	*b*	*c*, *d*	*e*	*f*, *g*, *h*, *i*
après exécution des tronçons..............	4	5	6	7	9

B. – Voûtes de 17^m. — En deux rouleaux ; à la clef et aux retombées, joints secs maintenus comme ceux de l'ogive, puis matés en commençant par la clef.

7. Décintrement de l'ogive (30 novembre 1907).

A. – État d'avancement du pont. — L'ogive portait : au sommet, toute la pile ; sur les reins, les voûtes d'évidement, clef et retombées non clavées [13].

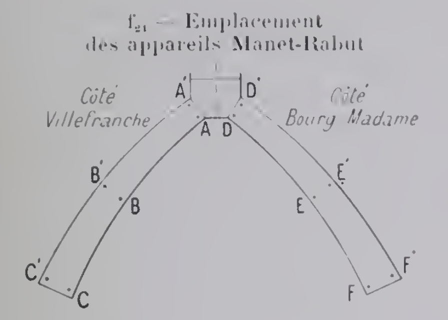
B. – Travail dans l'ogive, en $kg/\overline{0^m01}^2$. — On avait disposé, à l'amont et à l'aval, en A, B, C... D' E' F' (f_{21}). 24 appareils Manet-Rabut.

11. — Voir le pont de Ramounails (II, p. 188).

12. — Les coins et les barrettes étaient suiffés, pour empêcher le mortier d'y adhérer. Nous ne le faisons plus (Voir plus loin : Livre II, Titre III, Chap. II).
Les joints, à l'extrados, étaient bourrés de chiffons afin de rester propres.

13. — On les a matées après le décintrement de l'ogive.

f_{21} — Emplacement des appareils Manet-Rabut



Voici, d'après leurs indications, les efforts dus au décintrement, en supposant le coefficient d'élasticité du granit : E $(^{kg}/\overline{0^m01}^2) = 5{,}5 \times 10^5$.

	A	B	C	A'	B'	C'	D	E	F	D'	E'	F'
amont . . .	12k	7k	5k	5k	10k	5k	14k5	4k5	»	3k5	7k5	»
aval	»	4,5	»	4,5	7	»	9,5	8	»	5	10	»
moyenne	12	5,7	5	4,7	8,5	5	12	6,2	»	4,2	8,7	»

La courbe des pressions dues au décintrement se rapproche de l'intrados à la clef, de l'extrados aux reins.

8. Dates.

Commencement des travaux		2 mai 1906
Construction de l'ogive	Commencement des maçonneries	6 novembre 1906 [14]
	Montage du cintre	24 mars – 7 avril 1907
	Achèvement du 1er rouleau	24 août 1907
	Achèvement du 2e rouleau	15 septembre 1907
	Décintrement	30 novembre 1907
Dalle en béton armé	Moulage des entretoises	1er avril – fin mai 1908
	Pose de la dalle	1er juin – fin juillet 1908
Achèvement des travaux		Décembre 1908
Ouverture à l'exploitation		Juillet 1910

9. Quantités et dépenses.

A. – *Totales.*

	Décompte (rabais de 8 % déduit).		
1° Sous la dalle en béton armé	Fouilles	12.309f62	
	Remplissage	681f29	
	Maçonnerie à mortier (10.352mc)	349.611f02	
	Chainage des tympans	5.308f23	
	Chapes et gargouilles	2.213f54	
	Cintres	26.288f97	
	Indemnité allouée à l'entrepreneur	123.494f16	
	d_1 =	519.986f83	519.986f83
2° Dalle en béton armé	Béton (116mc72 à 70f)	8.170f12	
	Acier (21.531k à 0f65)	13.995f31	
	Enduit en ciment (220mq à 2f50)	550f	
	Coaltar (2 couches) (7296k à 0f25 et 0f15)	1.216f01	
	d_2 =	23.931f44	23.931f44
3° Garde-corps (11.456k à 0f85)		d_3 =	9.737f60
		D =	553.655f87

B – Par unité.

1° Ouvrage.— Prix
- par m.q. de surface utile . . . . D : 994mq14[15] = 556f91
- par m.c. de volume « utile » . . . . D : 24.040mc8[16] = 23f03
- par m.c. de maçonnerie à mortier . . . . . D : 10.352mc = 53f48

14. — Le mauvais temps arrêta à peu près complètement les travaux de décembre 1906 à mars 1907.
15. — Longueur entre abouts des garde-corps × Largeur entre garde-corps.
16. — Surface vue de l'élévation × Largeur entre garde-corps.

		Cube de béton	Poids de fer	Prix
2° Dalle seule en béton armé	par m. q. en plan.	0^{mc}117	21^{k}6	24^{f}1
	par m. c. de béton.	»	184^{k}	205^{f}

10. Personnel.

Projet : M. Sejourné. Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

Exécution : M. Séjourné.
M. Lanusse, Ingénieur des Ponts et Chaussées.
M. de Noëll, Chef de section.

Entrepreneurs : MM. Jean et Marc Sanfourche.

CHAPITRE II

OÙ ET POURQUOI
ON A FAIT DES PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

Art. 1. — Par économie. — On a jeté une grande arche :

par-dessus une rivière dans laquelle il eût été difficile de fonder : sol de fondation très bas[17] ou mauvais[18] ; crues hautes, subites, fréquentes[19], surtout s'il est facile de fonder sur berges (rocher apparent[20], terrain imperméable[17]) ;

par-dessus une gorge profonde[21], à la place d'un viaduc à très hautes piles[22], surtout entre deux flancs escarpés qui suppriment murs ou viaducs d'accès[23].

Pour une grande voûte, construite sur cintre retroussé, la hauteur au-dessus du fond ne coûte rien[22].

Art. 2. — S'il faut réduire les remous. — S'il y a des villages dans la vallée submersible en amont du pont, et en général dans les villes, on supprimera, si on le peut, les appuis en rivière[24].

Art. 3. — Si la voie coupe en biais la rivière. — Dans ce cas, ou les piles en rivière seraient dans le sens du courant, mais sous des voûtes à appareil biais, — ou normales à la voie sous des voûtes droites, mais alors elles seraient obliques au courant et encombreraient le lit.


Φ_2



Ronda

17. — Antoinette (II, p. 145). 18. — Bains-de-Lucques (III, p. 32).

19. — Collonges (I, p. 31), Oloron (I, p. 45), Gravona (II, p. 183), Bains de Lucques (III, p. 32), Morbegno (IV, p. 65), Prince-Régent (IV, p. 239), Max-Joseph (IV, p. 242).

20. — Gravona (II, p. 183), Castelet (II, p. 130).

21. — A Ronda (Andalousie), on a, au XVIIIe siècle, franchi la gorge du Tajo par une voûte de 13^{m}20 seulement (Φ_2). (Voir Tome II, p. 107, renvoi 1) — Date de la photographie : octobre 1893.

22. — Solis (I, p. 55), Wiesen (I, p. 235), Constantine (II, p. 107).

23. — Waldlitobel (II, p. 157), Rothweinbach (II, p. 171), Steyrling (III, p. 137), Montanges (III, p. 62).

24. — Grasdorf (IV, p. 129), Prince-Régent (IV, p. 239), Max-Joseph (IV, p. 242).

Il vaut mieux, quand on le peut, jeter par-dessus la rivière une voûte droite d'assez grande portée pour que les culées soient en dehors du courant [25].

Art. 4. — Pour l'aspect. — Dans une ville, on doit faire beau et grand [26].

Quand le pont à construire est près d'une grande voûte, on ne peut, avec de plus grands moyens, se reconnaître inférieur aux anciens Ingénieurs [27].

Art. 5. — Quand on a voulu une grande arche [28].

CHAPITRE III

CHOIX DE L'INTRADOS

Art. 1. — Pleins cintres.

A. - A une seule arche. — On a jeté un plein cintre par-dessus des tranchées de rocher, entre des berges très inclinées [29] : il est, là, assez peu gracieux ; il lui faut préférer un arc qui leur soit à peu près normal.

B. - A plusieurs arches.

B_1 – *Ponts proprement dits.* — Quand les naissances sont près du sol ou de l'eau, il y a, pour l'aspect, trop de tympans. Sont ainsi les ponts romains de Rimini [30], de Salamanque [31], — assez malencontreusement imités au commencement du XIXe siècle (Sèvres, Φ_3 ; Agen ; Moissac, Φ_4 ;...)

Φ_3 — Pont de Sèvres — mai 1906



Φ_4 — Pont de Moissac — août 1908



Ces ponts bas, lourds, semblent faits pour porter quelque chose [32].

25. — Marella, Prarolo (III, p. 93), Isola del Cantone (III, p. 98), Gour-Noir (III, p. 103), Pouch (III, p. 110), Freyssinet (III, p. 112), Jaremcze (III, p. 114), Diveria (III, p. 130), Castelet (II, p. 130), Escot (II, p. 174).

26. — Prince-Régent (IV, p. 239), Max-Joseph (IV, p. 242), Walnut Lane (II, p. 83), Rocky River (II, p. 95), Constantine (II, p. 107).

27. — Claix (III, p. 36), Lavaur (II, p. 135), Céret (II, p. 160). 28. — Plauen (III, p. 52).

29. — Pont de St Sauveur sur le Gave de Pau (I, 27).

30. — Φ_{14}, p. 111. 31. — Φ_{15}, p. 112.

32. — Projet de Palladio pour le pont du Rialto : le socle rappelle le pont de Rimini. Giovanni Rossi, *Le Fabbriche e i Disegni di Andrea Palladio*, Tome IV, p. 77, 78, 79, Tav. LII, LIII, Vicenza, 179[illegible]

Il faut que les naissances soient franchement au-dessus de l'étiage [32].

Les pieds-droits doivent être, ou assez bas pour un pont, ou assez hauts pour un viaduc.

B_2 – *Viaducs*. — Voir l'APPENDICE.

Art. 2. — Ellipses. — Les naissances seront, comme celles d'un plein cintre, au-dessus de l'eau ; autrement, à la moindre crue, on ne voit plus qu'un pont à arcs très peu surbaissés, à naissances noyées, d'aspect désagréable [33], — mais pas trop haut : il ne faut pas jucher une ellipse sur de hauts pieds-droits : un pont en ellipse doit rester bas [34].

A. - A une arche. — Il y a de fort belles voûtes très peu surbaissées [35] ; on en peut aussi faire de très plates (Φ_5).

Φ_5 — Pont sur le Canal de Brienne, à Toulouse [36] — juillet 1912



32. — Pont en plein cintre de Sèvres (Φ_3), où le barrage de Suresnes a élevé l'eau à 2m10 au-dessus des naissances.

33. — Pont de l'Alma (I, p. 153), Viaduc du Point du Jour.

34. — Ceci, en dépit de quelques ponts récents : Ponts de la Reine Marguerite à Rome (Φ_6 p. 95) et à Turin (Φ_{10}, p. 110), Pont Cavour, à Rome (Φ_7, p. 95).

35. — Lavaur (Vieux Pont) (I, p. 97), Gignac (I, p. 103).

36. — Près du pont des Amidonniers.

B. - A plusieurs arches.

B_1. - Les naissances sont au-dessus des chaperons.

Φ_6 – Pont de la Reine Marguerite, à Rome - août 1908

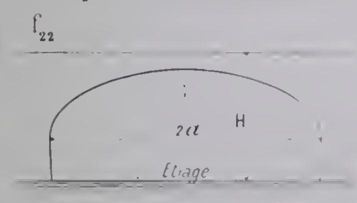


Φ_7 – Pont Cavour, à Rome - août 1908



Ces ponts sont un peu juchés.

B_2 - Les naissances sont plus basses que les chaperons.



C'est l'emploi ordinaire et le meilleur, de l'ellipse.

On aura un joli pont en prenant :

$$2\,a = 2.5\ \text{H}\ (f_{22}),$$

et le surbaissement du 1/4.

Art. 3. — Arcs.

A. Un seul grand arc.

A_1. *Arcs peu surbaissés.* — L'œil accepte fort bien un grand arc à grande flèche, retombant sans pieds-droits sur le terrain naturel[37] : l'arc-en-ciel, peu surbaissé, est fort gracieux.

Il n'y faut pas de petits pieds-droits[38] : si on ne peut pas les supprimer tout-à-fait, on les élèvera aux dépens de la montée.

A_2. *Arcs très surbaissés.* — Il faut, dessous, assez d'air[39].

B. Plusieurs arches.

B_1. *Meilleur surbaissement.* — L'arc est disgracieux quand il n'est pas très surbaissé.

Un pont au 1/3 est très lourd : il faut au moins le 1/6.

Le meilleur surbaissement est 1/7,5, 1/8[40] ; on ne dépasse guère 1/10[41, 42].

Aux arches très tendues, il faut des culées très résistantes : le moindre recul est fort dangereux.

37. — Pont du Castelet, surbaissé à 1/2,94 (II, p. 130).

La partie au-dessus du sol du pont de Lavaur est surbaissée à 1/2,68 (II, p. 135). Vieux ponts de Nyons (II, p. 25), de Tournon (II, p. 35), de Claix (II, p. 42).

38. — Céret (II, p. 160), Jaremcze (III, p. 114),...

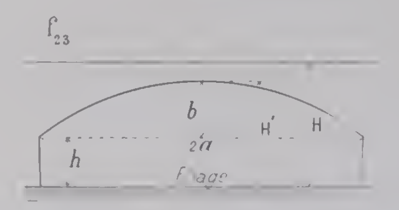
39. — Turin (III, p. 199), Claix (III, p. 36).

40. — Concorde (Φ_{30}, p. 117)

41. — Iéna.

42. — Le pont de Nemours (1795-1804), construit par Boistard sur les dessins de Perronet, est surbaissé au 1/15.

L'arche d'expérience de Souppes, de 37m88 d'ouverture, était surbaissée à 1/18 (III, p. 375).



B. — Rapport entre la portée et la hauteur. — Sous un pont à plusieurs arcs, il faut des pieds-droits ajustés, ni trop bas [43], ni trop hauts.

Le rapport de la hauteur h des pieds-droits à la hauteur sous clef H' est 0,56 à 4 ponts en arcs réussis [44].

Si on est libre et qu'on ne se préoccupe que de l'aspect, on prendra pour la portée 3 fois, 3 fois 1/2 la hauteur totale, et le surbaissement de 1/7,5 : on aura un joli pont.

Si les crues y obligent, on tend les arcs et on accepte des pieds-droits trop hauts (Φ_8).

Φ_8 — Pont de Tilsitt, sur la Saône, à Lyon (1864) [48 bis]



Art. 4. — Ogives. —

A. Ogive surhaussée. — C'est l'intrados des voûtes lourdement chargées à la clef [45].

On l'a adoptée aussi pour d'autres motifs.

Comme elle pousse peu, elle convenait pour des ponts du Moyen-Age, qui « *s'exécutaient arche par arche au fur et à mesure des ressources* [46] », chaque pile devant jouer successivement le rôle de culée ; elle convient pour des voûtes d'élégissement longitudinal qui poussent les tympans [47, 48].

Grâce à sa hauteur, elle s'inscrit dans le toit pointu des cathédrales, dans l'angle de deux fortes rampes (Φ_9) ; elle assure un passage à travers une pile, un pilastre [49].

43. — Ponts du Moyen-Age en arcs peu surbaissés, avec naissances à l'etiage, sans pieds-droits. Ils gênent les crues et sont affouillés (Avignon, Saint-Esprit, La Guillotière, Ratisbonne,...)

Φ_{10}



44.

	$\sigma = \frac{b}{2a}$	$\varepsilon = \frac{h}{H'}$
Pont National, à Paris	1/7,5	0,55
Pont d'Austerlitz, à Paris	1/6,8	0,56
Pont de Roanne	1/8	0,56
Pont Corneille, à Rouen	1/7,5	0,57

45. — Fontpédrouse (V, p. 87).

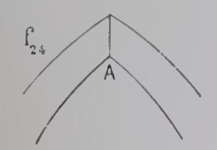
46. — Choisy, *Histoire de l'Architecture*, Tome II, p. 563.

47. — Chester (III, p. 29), Luxembourg (II, p. 67).

48. — On a, fort à tort, fait en ogive des ouvrages de la ligne d'Arles à Marseille (1850-54) (Φ_{10} — Pt 858k + 274 de Paris).

48 bis. — Date de la photographie : août 1907.

49. — Lavaur (II, p. 135), Luxembourg (II, p. 67).



Son cintre, peu chargé, est léger.

Comme il ne faut pas d'angle rentrant dans une pierre, il y a un joint au sommet A (f_{24}), ou bien, comme à Fontpédrouse[50], des clefs suppriment la pointe de l'intrados.

Φ_9 — Pont de Mostar[53bis]



B. - Ogive surbaissée[51]. — L'ogive très élégante et hardie du pont de la Trinité[52] ne fait bien que bas : elle a été fâcheusement employée au pont sur la rue d'Alésia à Paris[53].

L'angle du sommet motive et justifie un cartouche.

50. — V, p. 87.
51. — Pont de Martorell (III, p. 313).
52. — III, p. 340 ; V, Φ_2, p. 105.
53. — Ligne de Sceaux (III, p. 340).
53bis. — Date de la photographie : mai 1911.

TITRE XII

QUELQUES RÉFLEXIONS SUR L'ARCHITECTURE DES PONTS

CHAPITRE I

ENSEMBLE DE L'OUVRAGE

Art. 1. — Caractère de l'architecture des ponts. — Un pont est fait pour qu'on passe dessus : c'est une œuvre d'utilité, et qui doit durer. Il doit être et paraître ajusté à son objet, solide, clair, simple, bien exécuté, sans vains ornements.

Écoutons Perronet : « *Les grands Ponts étant.... des monuments qui peuvent « servir à faire connoître la magnificence et le génie d'une Nation, on ne saurait « trop s'occuper des moyens d'en perfectionner l'Architecture, qui peut d'ailleurs « être susceptible de variété, en conservant toujours dans les formes et la décoration, « le caractère de solidité qui lui est propre*[1] ».

. . . .

« *Le pont* », — de la place Louis XV[2], — « *devant être construit dans la « Capitale...... dans un lieu où la Nature & l'art ont répandu les plus beaux « aspects & des édifices de la plus grande magnificence, nous avons cru indispen- « sable de lui donner un caractère de décoration : nous n'y avons cependant « employé aucune espèce d'ornements de Sculpture, autant pour ne pas trop sortir « du genre de simplicité consacré à ces sortes de monuments, que pour ne point « affoiblir le caractère mâle qui convient à l'Architecture des Ponts*[3] ».

Art. 2. — Proportions. — Un pont en maçonnerie vaut par ses formes générales, ses grandes lignes, ses proportions, son intrados, par un heureux rapport de la portée à la hauteur, de la montée à la portée : la décoration n'y compte guère.

Chacun de ses éléments, voûtes, piles, culées, tympans, couronnement, doit avoir l'importance qui lui revient, ne pas entreprendre sur les autres, bien s'ajuster à l'ensemble.

Ils seront tous légers dans un pont léger ; tous lourds, dans un pont lourd.

On n'écrasera pas de légères voûtes par un lourd tympan, des piles grêles par des bandeaux à grand appareil, des tympans évidés par un parapet plein,....

Art. 3. — Adaptation aux lieux. — Le pont doit être adapté, non seulement aux lieux, mais au climat, aux monuments voisins, à la lumière, à la couleur locales : il doit sentir le terroir, avoir poussé naturellement sur le sol, n'avoir pas l'air importé, transplanté : il faut à Toulouse un pont toulousain.

1. — A la fin du Mémoire sur la *Réduction de l'épaisseur des Piles & sur la Courbure qu'il convient de donner aux Voûtes*, lu à l'Académie des Sciences le 12 novembre 1777.

Perronet : « *Description des projets et de la construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orleans et autres* »,... Tome I, p. 112, Imprimerie Royale M DCCLXXXII.

2. — Aujourd'hui : de la Concorde.

3. — *Loc. cit., renvoi 1*, Tome II, p. 27, « *Pont de la place Louis XV* ».

Art. 4. — Viaducs. — La beauté d'un viaduc est dans le rapport de la portée à la hauteur, dans ses arêtes montantes et sa courbe d'intrados. Il faut que rien ne coupe les piles : pas de socles, pas de cordon aux naissances, pas de tailloirs aux contreforts, pas de chaînes d'angles aux arêtes des piles, pas de saillie des bandeaux sur la douelle ; pas d'autres lignes horizontales que celles du couronnement [4].

Art. 5. — Il ne faut pas se trop laisser conduire par les calculs. — Le projet fait, on s'assure qu'il tient : la science doit aider l'art, mais non pas l'étouffer. S'il manque de la matière quelque part, on en ajoute, mais sans blesser l'œil ; au besoin, on ne lui fait pas voir tout ce qu'il faut pour la stabilité : ainsi on cachera derrière un tympan plein une voûte trop épaisse aux reins ; s'il y en a trop, on en retranche, mais seulement ce que permet l'œil.

Art. 6. — Si on copie, ne pas faire de faute de copie. — Quand on se borne à copier, tout au moins faut-il faire s'accorder ce qu'on a emprunté : par exemple, ne pas juxtaposer des éléments d'un pont lourd et d'un pont léger.

On a trop copié depuis quelque cent ans.

Art. 7. — Se préoccuper toujours de l'aspect. — De tous les ouvrages, — je dis de tous, même des petits, — l'aspect importe : il n'est pas permis de faire laid.

C'est une étrange opinion que d'estimer cher ce qui est beau, bon marché ce qui est laid : on a fait laid et cher, beau et bon marché.

C'est dans les tracés qu'on économise : après, on ne fait plus que glaner, que grappiller. Ce qu'on gagne sur les ouvrages est misérable, et c'est faire voir bien peu de goût que les gâter pour si peu.

Art. 8. — Travailler toujours au progrès de l'art des ponts. Tout n'a pas été fait, depuis quelque deux mille ans qu'on bâtit des ponts. Dans une grande ville, dans une capitale, on n'a pas le droit de faire un grand pont qui ne marque un progrès.

« *Il en résultera peut-être un surcroît de dépense, mais l'art des Ponts ne* « *saurait être trop perfectionné et il ne peut l'être que par de grands exemples ;* « *il en coûte plus pour l'ouvrage qu'on entreprend, mais il en coûte moins pour* « *ceux qui suivent* [5]. »

On a maintenant d'excellents mortiers ; on se joue des difficultés de fondations. Avec de plus grands moyens, a-t-on fait mieux que les anciens Ingénieurs ?

Art. 9. — Les Ingénieurs doivent savoir l'Architecture. — Les Savants qui ont fondé l'Ecole Polytechnique : Laplace, Monge,.... y ont institué un Cours d'Architecture.

A l'Ecole des Ponts et Chaussées, elle est aussi enseignée, — et fort bien.

4. — Appendice, Viaducs.

5. — Mémoire présenté au Roi par les Etats du Languedoc, 31 décembre 1779.

Sans doute, les Ingénieurs doivent avoir appris la Résistance des Matériaux : mais l'utile n'est pas tout.

La culture intellectuelle ne doit pas être rétrécie à l'utile seul, et ç'a été un crime que de lui sacrifier, — pour un temps, j'espère, — les vieilles Humanités.

CHAPITRE II

ÉLÉMENTS DE L'OUVRAGE

Art. 1. — Appareil. — Les épaisseurs des assises, la vigueur de l'appareil, le poids apparent des matériaux doivent aller en diminuant du sol au couronnement[6].

Art. 2. — Piles, culées. — Les pieds, les supports de l'ouvrage, doivent paraître tout particulièrement solides : pour en assurer l'œil, on les revêt d'assises épaisses, avec bossages : on leur donne du fruit.

Art. 3. — Voûtes. — Dans les ponts en maçonnerie, la voûte est tout.

On accentue vigoureusement ses têtes par une forte saillie sur les tympans, par l'appareil des voussoirs ; on les relève d'une archivolte ; on exagère les dimensions de la clef : on la fait saillir au-dessus et au-dessous du bandeau ; on la flanque de deux contre-clefs ; on y sculpte un cartouche.

Art. 4. — Tympans. — Les tympans, qui sont un poids sur le dos de la voûte, doivent être et paraître légers : on les revêt d'assises minces, de briques.

On se gardera, même dans une capitale, de les faire en pierres de taille de grand appareil.

On les traverse par des voûtes d'élégissement ; dans un pont long, on les raye de lignes d'ombre par des pilastres.

Art. 5. — Pilastres. — Au-dessus d'une pile, un pilastre sépare et encadre deux arches voisines ; sur une pile-culée, il peut séparer utilement une grande arche de petites voûtes d'accès.

Plaqué sur une culée pleine, il fait partie de la culée, il ne sépare rien.

On appareille un pilastre avec plus de vigueur que les tympans qu'il encadre, avec moins que les piles qu'il surmonte.

Art. 6. — Couronnement. — Pour regarder un pont, il faut reculer assez loin : on ne voit plus alors les petites moulures des chaperons, des corniches, des bahuts. Il en faut donc peu, mais de simples, nettes de loin, avec fortes saillies.

La hauteur et la saillie des corniches seront ajustées au pont.

On mettra sur un pont lourd, à tympans pleins, une corniche épaisse ; sur un pont léger, très évidé, un parapet très ajouré ; sur les culées, qui doivent toujours paraître robustes, un parapet plein.

6. — Au Pont de Saint-Loup (Ligne de La Ferté-Hauterive à Gannat, 1911-14), la saillie des bossages est de 4 à 5^{cm} aux culées, 3 à 4^{cm} aux piles, 2^{cm} aux pilastres et aux bandeaux.

Voir aussi : APPENDICE, Viaducs.

TITRE XIII

RESPECT AUX VIEUX PONTS

On a gâté de vieux ponts pour les élargir.

Au pont de la Tournelle à Paris, au pont de la Guillotière à Lyon, il n'y a pas très grand dommage.

Mais on a failli porter la main sur le joli pont d'Entraygues[1].

Des Ingénieurs se sont rencontrés, qui ont proposé de démolir le beau pont de Toulouse[2], le seul du pays qu'ait laissé debout la terrible crue de 1875.

C'est une méchante action que de jeter par terre un fruit, une parure de la « terre des pères » : c'est nous diminuer.

On doit respecter les choses qui ont duré, surtout celles de chez nous.

Restons fidèles au passé, soutien du présent et garant de l'avenir, et gardons des Barbares nos vieux ponts, nos vieilles églises, toute notre vieille France... *Præteriti fides, spes futuri.*

1. — Φ_5, Φ_6, p. 34.

2. — Φ_7, p. 57 ; Φ_5, p. 84.

TITRE XIV

DÉCORATION DES PONTS

CHAPITRE I

QUELQUES RÉFLEXIONS SUR LA DÉCORATION DES PONTS

Dans un pont, la décoration doit seulement distinguer les différents membres, marquer, accentuer le rôle et l'importance de chacun. Mais elle doit faire partie du corps même de l'ouvrage : elle ne doit pas en pouvoir être détachée : elle ne sera pas rapportée, accrochée, plaquée.

Elle doit être sobre, discrète, modeste, raisonnable, utile [1].

Elle sera à l'échelle du pont : du point d'où on le regarde, il faut qu'on la voie. Les Architectes qui ont décoré des ponts ont quelquefois oublié qu'un pont n'est pas une maison, ni un théâtre, qu'on regarde de tout près, et les ont chargés de petites choses qu'on ne voit pas de loin.

On doit se rendre très exactement compte [2] de l'effet que fera, réalisée en vraie grandeur, une disposition agréable en dessin : on a eu des désillusions.

On n'est point obligé de traiter de même les deux têtes d'un pont [3,4].

CHAPITRE II

TÊTES DES VOÛTES

§ 1. — *BANDEAUX A CROSSETTES*

Au XVIII[e] siècle, dans le centre de la France, on a presque toujours extradossé les bandeaux à crossettes [5,6] (f_1).

f_1

On a fait ainsi, en Italie dans les premiers ponts de chemin de fer [7], aux États-Unis [8], en Suisse [9], en Autriche [10], en Allemagne [11], en Angleterre [12].

1. — La coupe horizontale de quelques piles de Gauthey est en ovale. Les douelles de ses ponts de Navilly sur le Doubs et sur la Guyotte, qui ne sont vues que des pêcheurs et des grenouilles, sont à caissons : c'est raffiner hors de propos.

2. — Par des maquettes en plâtre, en terre, en pâte plastique... Il est bon d'avoir dans les bureaux des dessinateurs qui y soient exercés.

Perronet a fait faire beaucoup de maquettes : celles des ponts de Pont-Sainte-Maxence et de la Concorde sont à l'Ecole des Ponts-et-Chaussées.

3. — Pont des Amidonniers (I, p. 193).

4. — Pont de Saint-Loup sur l'Allier, 1910-1914 (Ligne de La Ferté-Hauterive à Gannat). La tête amont est revêtue de briques et coupée par des pilastres au-dessus des piles ; la tête aval est en moellons ordinaires à joints incertains, sans pilastres.

5. — *Ponts en anse de panier :* Blois, 1716-24 (Φ_1, p. 32 ; Φ_4, p. 107) ; Orléans, 1751-60 (Φ_1, p. 82 ; Φ_5, p. 107) ; Saumur, 1756-70 (Φ_{23}, p. 116) ; Mantes, 1757-65 (I, p. 160) ; Tours, 1764-77 (Φ_{25}, p. 116 ; Φ_{38}, p. 122) ; Neuilly, 1768-74 (Φ_9, p. 109 ; Φ_{39}, p. 122) ;...

6. — *Ponts en arc :* Fouchard, à Saumur, 1773-84 (Φ_{26}, p. 116) ; Pont-Sainte-Maxence, 1771-86 (p. 68, renvoi 25) ; Brunoy, 1785-87 (Φ_{24}, p. 116) ; Concorde, 1786-91 (Φ_{30}, p. 117) ; Nemours, 1795-1804 (p. 95, renvoi 42) ;...

7. — Prarolo (III, p. 93), Isola del Cantone, pont aval (III, p. 98).

8. — Cabin John (III, p. 75), Wheeling (III, p. 47). 9. — Nydeck (II, p. 51).

10. — S[t]-Etienne (II, p. 55). 11. — Reichenbach (IV, p. 183).

12. — Londres (I, p. 147), Waterloo, à Londres (Φ_{18}, p. 113), Gloucester (I, p. 107), Putney (III, p. 239), Edouard VII (I, p. 182).

Les bandeaux à crossettes ne sont pas à conseiller.

Ils sont chers ; la voûte et les tympans ne font qu'un, alors qu'il faudrait séparer ce qui porte de ce qui est porté : les intrados semblent découpés dans un mur plein.

§ 2. — *ARCHIVOLTES*

Art. 1. — Avantages. — L'archivolte accentue la voûte, la sépare franchement de ses tympans. C'est une excellente décoration : on ne l'a pas assez pratiquée.

Elle est particulièrement motivée sous tympans très évidés, parce qu'on voit alors toute l'épaisseur de la voûte aux reins : il est bon, pour l'œil, de la diviser.

Elle n'est pas justifiée dans un pont rustique, simple, au-dessus d'un bandeau à bossages.

Φ_1 — Pont St-Ange (Pont Ælius) à Rome [13] (138 ap. J.-C.)



Les Romains en ont fait grand usage dans leurs ponts (Φ_1), leurs portes, leurs arcs de triomphe, et aussi les Italiens de la Renaissance : ponts du Rialto (Φ_{29}, p. 117) et des Soupirs (Φ_{30}, p. 125) à Venise, pont Saint-Michel à Vicence, pont de la Trinité à Florence (Φ_2, p. 105).

En France, au XVIIIe siècle, tandis que dans le Centre on supprimait toute saillie au bandeau, en Languedoc [14], en Bourgogne [15], revenant à la tradition romaine, on le détachait par de vigoureuses archivoltes.

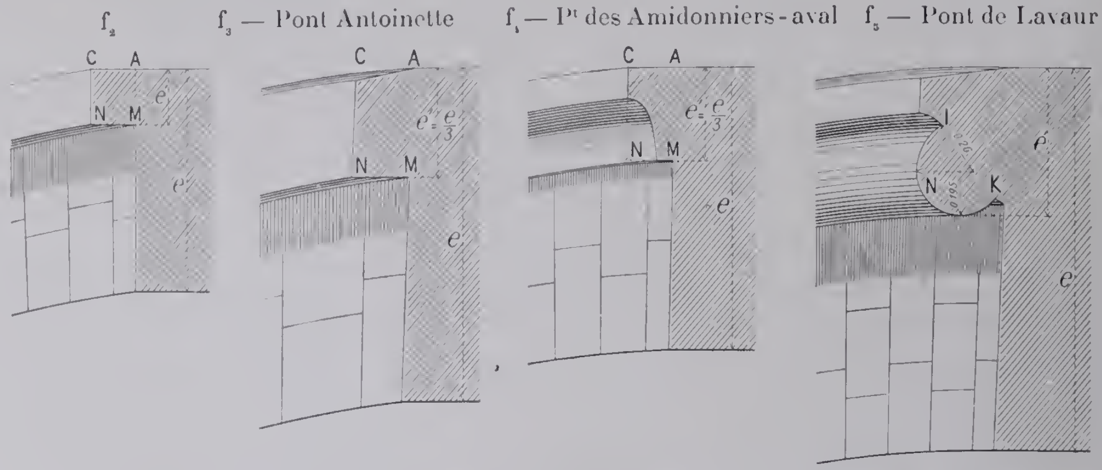
13. — Date de la photographie : août 1908.

14. — Lavaur (I, p. 97), Gignac (I, p. 103).

15. — Ponts de Gauthey : Pont-Pierre, sur la Thalie, 1766-70 ; Ponts de la Barque sur la Vallière, 1777-80 ; de Gueugnon, sur l'Arroux, 1783-87 ; de Saint-Laurent, sur la Saône, à Chalon, aval, 1784-89 ; de Navilly, sur la Guyotte, 1786-89.

Art. 2. — Profils. — L'archivolte peut être un simple filet ACNM (f_2)[16], avec une pente AC (f_3)[17].

f_2 — f_3 — Pont Antoinette — f_4 — P^t des Amidonniers-aval — f_5 — Pont de Lavaur

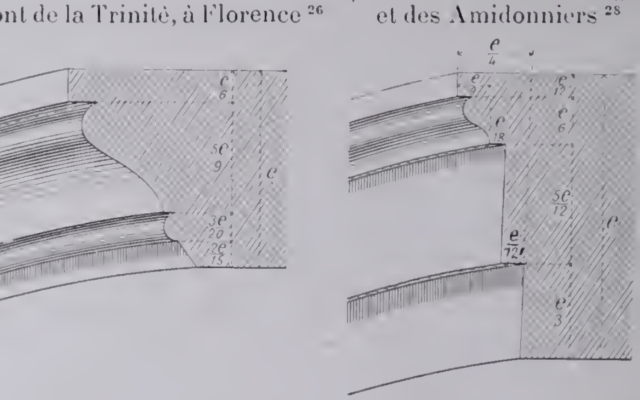


On y peut soit creuser un cavet (f_4)[18], soit dégager le tore INK (f_5) : c'est l'archivolte des porches romans, — peut-être un peu lourde à Lavaur[19] (f_5), puis à Valence[20, 21].

On adopte pour $\frac{e'}{e}$ (f_7) un rapport simple 1/3[22], 1/4 ; à 1/6, l'archivolte n'est plus qu'un mince filet[23].

On peut encore diviser le bandeau en tables[24] (f_6, f_7), orner de moulures toute l'archivolte (f_8).

f_6 - Pont St-Ange, à Rome[25] — f_8 - Pont de la Trinité, à Florence[26] — f_7 - Ponts de Luxembourg[27] et des Amidonniers[28]



Pour toutes ces archivoltes, il faut, entre les hauteurs de la moulure et des tables et l'épaisseur totale de la voûte, des rapports simples voisins de ceux du Vieux pont de Lavaur[29]. Si on s'en écarte trop, l'effet se perd.

16. — Pont de Narni, sur la Nera (Italie). Voir III, p. 317.
17. — Antoinette (II, p. 145), Gour-Noir (III, p. 103), Rébuzo (I, p. 48), Morbegno (IV, p. 65), Lusserat (III, p. 155).
18. — Porte de Pérouse. Amidonniers (face aval) (I, p. 196^IV, Pl. 3, f_{28}).
19. — II, p. 135. 20. — I, p. 173.
21. — On a relevé ainsi par des boudins romans des têtes de souterrain sur les lignes de Rodez à Millau, de Mende à Severac, de Mantes à Argenteuil.
L'effet est excellent pour ceux à deux voies (souterrain de Meulan, ligne de Mantes à Argenteuil).
22. — Antoinette (II, p. 145). 23. — Narni. 24. — Gignac (I, p. 103).
25. — Eau-forte du Piranèse. — Mes photographies. 26. — Voir Φ_2, p. 105.
27. — II, p. 68^IV, Pl_2, f_{11}. 28. — I, p. 196^IV, Pl_3, f_{22}.
29. — I, p. 96bis, Pl_1, f_5. On les a adoptés à Luxembourg, aux Amidonniers (f_7).

Art. 3. — Appareil. — Voir Titre I, p. 17, dernier alinéa.

Art. 4. — Fruit. — Quand, ce qui est le cas général, l'épaisseur de l'archivolte augmente à partir de la clef, il faut, de même, qu'augmente la saillie ; elle aura ainsi plus de fruit que la voûte [30].

Φ_2 — Pont de la Trinité, à Florence [31]



Art. 5. — Archivoltes de voûtes en briques. — Avec la brique, il est facile de faire, à peu de frais, des archivoltes d'un bon effet [32] : on fait simplement ressauter chaque rouleau sur le rouleau inférieur.

Art. 6. — Arrêter ou recevoir l'archivolte. — Quand on fait une archivolte, il faut la recevoir, l'arrêter quelque part, ne pas la laisser suspendue.

A Lavaur [33], elle se retourne horizontalement à 60° de la clef; au pont Antoinette [34], elle s'enfonce dans le sol avec l'arc ; à Luxembourg [35], elle est arrêtée par un sommier.

Les archivoltes et leur retour horizontal sont souvent sous des voûtes d'élégissement.

Si ce retour est bas, les piles d'élégissement sont hautes et s'appuient sur une partie fuyante de la voûte ; s'il est haut, il reste dessous trop de tympan, au détriment de l'aspect.

30. — Les fruits sont :

	Têtes	Archivoltes
au Pont de Lavaur	1 25	1 22
au Pont Antoinette	1 25	1 20

31. — Voir Tome III, p. 340. — Date de la photographie : juin 1908.

32. — Pont de Saint-Waast, sur l'Agoût (1882-84), Ligne de Montauban à Castres (Φ_{31}, p. 118).

33. — II, p. 135. 34. — II, p. 145. 35. — II. p. 67.

Si des pilastres encadrent la grande voûte, il faut que le retour horizontal soit assez long.

Il n'est pas facile d'accorder ces conditions opposées.

§ 3. — *BANDEAUX, AVEC TABLE INFÉRIEURE EN RETRAITE SUR LES TYMPANS*

Dans les ponts romains, plus tard en Languedoc, en Bourgogne, l'archivolte est en saillie sur les tympans.

Au moyen-âge, la voûte est souvent en rouleaux : le supérieur dans le plan du tympan, l'inférieur en retraite (Φ_3), [36, 37].

Φ_3 — Vieux pont de Prague (XIVe) [38]



Quelquefois, on a mis en encorbellement les tympans sur les têtes, les parapets sur les tympans [39] : la chaussée est plus large que la voûte.

§ 4. — *CLEFS PENDANTES. — CARTOUCHES*

Dans les ponts ornés, on marque le milieu de la voûte par une clef et des contre-clefs [39 bis], soit plates [40], soit, mieux, sculptées [41] aux armes du pays, de la

36. — Dans les églises ogivales, les voûtes des nefs sont ainsi.

37. — Ponts de Soissons (Choisy : *Histoire de l'Architecture*, II, p. 564); d'Espalion ; d'Entraygues : sur la Truyère (Φ_5, Φ_6, p. 34), sur le Lot ; vieux pont à Chester,....

38. — Date de la photographie : Septembre 1904.

39. — Vieux pont de Pise (Choisy : *Histoire de l'Architecture*, tome II, p. 564).

39 *bis*. — Elles pourront relier utilement une corniche à une archivolte (Luxembourg, II, p. 68^V^), Amidonniers (I, p. 196^IV^).

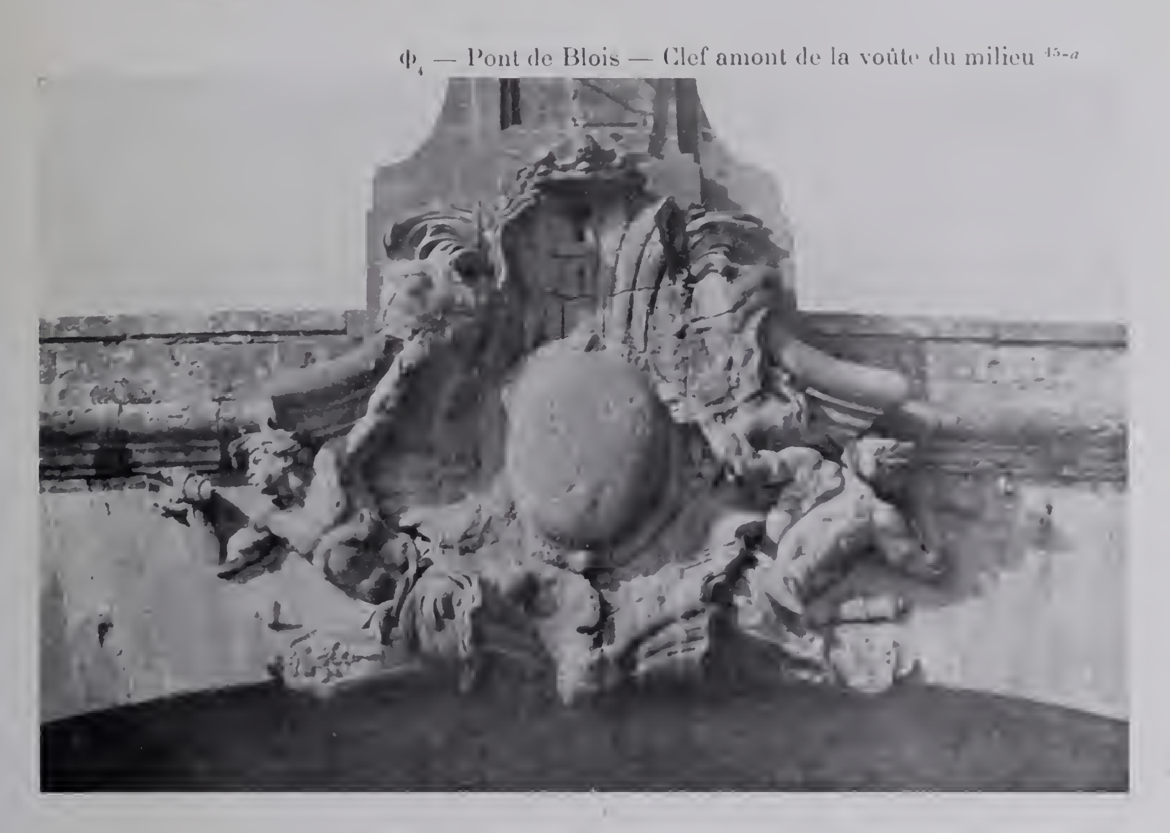
40. — Aux vieux ponts de Lavaur (I, p. 97) et de Gignac (I, p. 103), on devait sculpter sur les clefs les armes du Languedoc.

41. — Ponts Montaudran et des Minimes à Toulouse sur le canal du Midi (Φ_{12}, Φ_{13}, p. 123).

province [42], de la ville, du souverain [43].

Voici le beau cartouche sculpté à Blois par Guillaume Coustou (1724) [44] :

Φ_4 — Pont de Blois — Clef amont de la voûte du milieu [45-a]



Si le pont a plusieurs arches, on ne mettra de cartouche qu'à la clef de la voûte centrale, pour bien marquer le milieu du pont, surtout s'il est en dos d'âne et a, alors, un sommet (Φ_5).



Φ_5 — Vieux pont d'Orléans [45-b]



On peut n'en mettre qu'à l'amont [46], ne pas faire le même à l'aval [47].

Les gens qui passent sur le pont voient le dos du cartouche : il y faut dessiner quelque chose [46, 48].

42. — Ornaisons (I, p. 65) ; Amidonniers (I, p. 193).

43. — Luxembourg (II, p. 67).

44. — La Révolution brisa la couronne royale, martela les fleurs de lys de l'écusson.
De Dartein. *Etudes sur les Ponts en pierre remarquables par leur décoration antérieurs au XIXe siècle*, vol. II, p. 92. "*Pont de Blois, par Jacques Gabriel et Pitrou*, 1716-1724".

45. — Dates des photographies : *a*, avril 1914 ; *b*, août 1905.

46. — Vieux pont d'Orléans (1751-60).

47. — Blois, Luxembourg (II, p. 67), Amidonniers (I, p. 196IV, f_{17}, f_{19}).

48. — Luxembourg (II, p. 67).

Le cartouche doit être à l'échelle du pont (Φ_6) : on l'a parfois fait trop petit. A Toulouse [49], le cartouche central a 8^m de long.


Φ_6 — Aqueduc de Montpellier (1770-72) [50]



Aux ponts du Prince-Régent [51] et Max-Joseph [52] à Munich, on a suspendu des appliques de bronze.

§ 5. — *VOUSSURES*

Art. 1. — Pourquoi on a échancré par une voussure des têtes de ponts.

1° Pour mieux entonner les eaux : ceci n'est qu'un prétexte qui, au demeurant, ne les justifie pas à la tête aval.

2° Pour réduire l'avant-bec des piles : c'est une raison. — On a fait ainsi aux Amidonniers, seulement à la tête amont.

3° Pour l'aspect : c'est, je crois, fort à tort ; de loin, d'un pont en ellipse avec voussure, on voit surtout les bandeaux en arc : on dirait d'un pont en arc renforcé aux reins : c'est lourd [53].

Tout au contraire, on a très heureusement ébrasé en bouche de cloche les arches latérales de Gignac [54].

49. — Amidonniers (I, p. 196^{IV}, f_{17}). 50. — Date de la photographie : juin 1914.
51. — IV, p. 239. 52. — IV, p. 242.
53. — Neuilly (ϕ_9), Alma (I, p. 153), Empereur-François (I, p. 168), Valence (I, p. 173). 54. — I, p. 103.

4° Pour élargir de vieux ponts (Φ_7, Φ_8).


Φ_7 — Pont St-Laurent, à Chalon-s S., amont [55, 60-a]


Φ_8 — Pont de Jurançon, sur le Gave de Pau [56, 60-b]





Art. 2. — Quels intrados a-t-on « voussurés » ? — On ne « voussure » guère que les ponts en ellipse [57], on « voussure » rarement les ponts en arc [58].

Φ_9 — Pont de Neuilly, sur la Seine [59, 60-c]



55. — Construit au xve siècle, élargi en 1785-89 par Gauthey. (De Dartein, loc. cit. renvoi 44. Vol. IV, p. 207.)

56. — Construit vers 1739, élargi en 1870-73.

57. — Tome I : Gloucester, p. 107 ; Annibal, p. 112 ; Diable, p. 116 ; Alma, p. 153 ; Empereur-François, à Prague, p. 168 ; Valence, p. 173 ; Amidonniers, p. 193.

58. — Mosca, à Turin (III, p. 199) ; pont Verdi, à Parme.

59. — Perronet : « *Description des Projets et de la Construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres....* » Tome Ier, Paris. Imprimerie Royale, MDCCLXXXII. p. 1 à 65, Pl. I à XIX.

60. — Dates des photographies : *a*. mai 1909 ; *b*. octobre 1909 ; *c*. août 1901.

Art. 3. — Tracé des voussures. — J'ai indiqué comment on avait défini les cornes de vache de l'Alma [61] et celles, plus courtes, de Valence [62].

Φ_{10} — Pont de la Reine Marguerite, à Turin [71-a]



Φ_{11} — Pont Humbert Ier, à Rome [71-a]



Il faut que les surfaces soient bien régulières, sans creux ni bosses : on n'y a pas toujours réussi (Φ_{11}).

Les voussures compliquent l'appareil et le cintre ; elles exigent beaucoup de pierre de taille et coûtent très cher.

Φ_{12} — Pont de Châtellerault [71-b]



Art. 4. — La voussure est-elle française ? — On en voit au Pont-Neuf de Paris (1578-1607) (Φ_{22}, p. 119), au pont de Neuilly (1768-74) (Φ_{9}) imité à Gloucester [63], au pont en arc de Homps (1781-88) [64], au pont Mosca à Turin [65], imité d'un projet de Perronet, à Bordeaux (1819-1822), à Châtellerault [65 bis] (Φ_{12}), à Barbentane sur la Durance [66], à l'Alma [67], puis à Prague [68], à Valence [69].

On s'en est fort engoué en Italie [70].

61. — I, p. 153. 62. — I, p. 173. 63. — I, p. 107.

64. — De Dartein, *loc. cit. renvoi II*, vol. III, p. 173. 65. — III, p. 199.

65 bis. — Pont de Châtellerault, 1564-1609. Directeur des travaux : de 1594 à 1606, Charles Androuet du Cerceau ; ensuite son fils René, architectes du Roi. — Les voussures dateraient de 1825-1830.

Bulletin et Mémoires de la Société des Antiquaires de l'Ouest. Tome XXIV (de la 2e série). Année 1900. « *Un Monument historique du XVIe siècle. Le Pont de Châtellerault, 1564-1830*, par M. Alfred Barbier. Mémoire : p. 1 à 85 ; pièces justificatives, p. 87 à 151.

66. — Ligne d'Avignon à Marseille (1846-49). 67. — I, p. 153. 68. — I, p. 168. 69. — I, p. 173.

70. — Ponts Annibal (I, p. 112), du Diable (I, p. 116) ; nouveaux ponts de Rome (Φ_{11}), de Turin (Φ_{10}).

71. — Dates des photographies : *a*-août 1908 ; *b*-mai 1907.

CHAPITRE III

MURS DE TÊTE

On y a creusé des niches [72] (Φ_{13}).

On a très souvent entouré d'un cadre un panneau en recul [73], avec ornements en relief (Φ_{14}) [74].

Φ_{13} — Pont de Rimini [75]



On a suspendu des couronnes [76], des écussons avec [77] ou sans [78] attributs, des médaillons [79] (Φ_{17}), sculpté des initiales [80], souvent trop maigres.

On a traversé les tympans d'arches ; on y a ouvert un œil-de-bœuf [81].

72. — Rimini ; Pont Marie, à Paris (XVIIe siècle) ; Gloucester (I, p. 107) ; Chester (III, p. 29) ; Bains-de-Lucques (III, p. 32) ;...

73. — Trinité (Φ_2, p. 105), Lavaur (Vieux Pont) (I, p. 97), Ballochmyle (I, p. 41), Calcio (III, p. 100), Bellefield (III, p. 49).

74. — Pont de Navilly sur le Doubs (Φ_{16}, p. 113).

75. — Date de la photographie : août 1908.

76. — Bercy, Louis-Philippe, à Paris.

77. — Austerlitz (Φ_{11}, p. 122).

78. — Iéna, Tilsitt (Φ_8, p. 96), Edouard VII (I, p. 182).

79. — Boucicaut (III, p. 243), Prince-Régent (IV, p. 239), Pont Isabelle, à Turin,...

80. — Saint-Michel ; Pont-au-Change ; Saint-Jean, à Saubusse ; Point-du-Jour,...

81. — Vieux Pont de Toulouse (Φ_7, p. 57) ; pont de l'Isle sur le Loir, près Bonneval (1710-1717).

Φ_{14} — Ponte Rotto, à Rome [82, 86-a]



Φ_{15} — Pont de Salamanque [86-b]



Pour de longs ouvrages, il est bon d'établir, au-dessus des piles, des pilastres : ils rayent d'une ligne d'ombre la surface monotone des tympans [83] ; ils réunissent les pieds et le couronnement du pont ; ils portent les dés du parapet, des candélabres, des statues,... On en voit dans des ponts romains (Φ_{15}) [84], dans des ponts du XVIIIe siècle [83], dans ceux de nos jours [85].

82. — Pont Palatin, restauré et décoré en 1575 par les Borghèse. (Leur chimère est sculptée dans les cadres). — Aujourd'hui *Ponte Rotto*.

De Dartein, *loc. cit. renvoi 44*, vol IV, Introduction, p. XVII.

Au pont de Navilly (Φ_{16}), pour le relief des tympans, Gauthey paraît s'être souvenu du pont Palatin.

83. — Tours (Φ_{25}, p. 116), Saumur (Φ_{21}, p. 116), Fouchard (Φ_{26}, p. 116),...

84. — Pont Saint-Ange (Φ_{1}, p. 103),...

85. — Londres (I, p. 147) ; Putney (III, p. 239) ; Marmande (Φ_{10}, p. 37) ; Tolbiac, à Paris ;...

86. — Dates des photographies : *a* - août 1908 ; *b* - mai 1889.

Φ_{16} — Pont de Navilly, sur le Doubs — amont [93-a]



Φ_{17} — Pont de Navilly, sur le Doubs — aval [93-a]



Sur les pilastres, on sculpte un motif de décoration : on l'a souvent fait trop maigre, trop menu [87].

On peut varier à l'infini les formes et la décoration du motif au-dessus des becs : pyramides (Φ_{16}) [88, 90], colonnes portant un globe [89, 90], piédouche portant un écusson (Φ_{17}) [90] ; globe sur la pointe d'un chaperon [91], sur un piédouche à fût cannelé [92] ;... Il y en a beaucoup à ne pas imiter, par exemple ce morceau de frise sur deux colonnes (Φ_{18}).

Dans ses ponts, Gauthey [90] a fait voir plus d'imagination que de goût. Retenons seulement qu'il ne s'est pas cantonné dans un type, qu'il a traité différemment chacun de ses 15 ponts : ceci est à imiter.

Φ_{18} — Pont de Waterloo, à Londres [93-b]



87. — Nouveau pont d'Ainay sur la Saône, à Lyon. — Pont de l'Université, sur le Rhône, à Lyon.

88. — Ponts des Echavannes (Φ_{8}, p. 57), Saint-Laurent à Chalon (Φ_{7}, p. 109).

89. — Pont de Cuisery (emporté en 1789).

90. — Ponts de Gauthey : De Dartein, *loc. cit. renvoi 11*, vol. IV, Introduction, p. XIV.

91. — Pont de Tours, aval (Φ_{23}, p. 116).

92. — Pont de Tours, amont.

93. — Dates des photographies : *a* - mai 1911 ; *b* - juin 1906.

Φ_{19} — Pont des Invalides, à Paris



Sur la pile, on a placé une statue (Φ_{19})[94], un groupe (Φ_{20}).

Au pont La Fayette (Φ_{20}), les sujets sont, de loin, indistincts, confus. Rien ne se dégage d'une tache générale sombre.

On voit bien les colonnes du pont Morand (Φ_{21}).

Ponts sur le Rhône à Lyon (1888-90)[95]

Φ_{20} — Pont La Fayette





Φ_{21} — Pont Morand



La décoration ne doit pas envahir l'ouvrage : elle doit rester modeste, effacée.

Il faut que les ornements soient à l'échelle du pont ; qu'on les distingue de loin ; qu'ils ne soient pas rapportés, mais fassent corps avec lui.

Je l'ai dit ; je le redis.

CHAPITRE IV

COURONNEMENT

§ 1. — *PLINTHE ou CORNICHE*

L'épaisseur, la saillie, varient suivant l'ouvrage, sa hauteur, ses formes. Aux hauts viaducs, aux ponts lourds, il faut une corniche épaisse, donnant une ombre large.

Une corniche sépare les tympans du parapet ; elle couronne l'ouvrage et supporte l'attique, toujours plus léger : ces deux membres doivent être et paraître fort différents : s'ils ont même aspect, la plinthe ne se comprend plus.

On a dit que la plinthe indique à l'œil le niveau de la voie ou du trottoir. Je n'entends plus guère cette raison-là.

94. — Alma (I, p. 153) ; Mirabeau.

95. — Date des photographies : juin 1909.

Il y a de beaux profils de corniche : celui de Rimini (ϕ_{22}), ceux à grand cavet des cathédrales des XIIe et XIIIe siècles [96], le gros boudin du XVIIIe [97, 98], posé sur un cavet (f_9) [99, 100], sur une doucine (f_{10}) [101].

On a placé la plinthe sur des modillons (ϕ_{22}) [102], des corbeaux : on en règle au mieux l'aspect, la hauteur, l'espacement. On les arrête aux culées, ils ne les pourtournent pas.

ϕ_{22} — Pont de Rimini [106]



Nous supprimons maintenant la plinthe sur les culées [103] : c'est plus vigoureux, plus cru. Les culées ne sont pas l'ouvrage, elles en sont le cadre : un peu brutales, elles l'arrêtent bien.

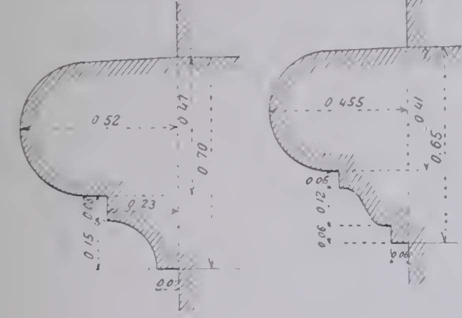
Dans nombre de ponts du Moyen-âge [104], dans de plus récents [105], il n'y a pas de plinthe.

96. — Castelet (II, p. 131, f_3), Lavaur (II, p. 136, f_5), Antoinette (II, p. 145, f_8), Saint-Waast (ϕ_{31}, p. 118). Voir aussi : Appendice, - Viaducs.

97. — Ornaisons (I, p. 64, f_3).

98. — Sa surface supérieure, presque horizontale, se couvre de mousse, de végétation, d'ordures.

f_9 - Pt de Neuilly - 4mm f_{10} - Pt de Blois - 4mm



99. — Ponts du XVIIIe siècle en Languedoc : des Minimes, sur le canal du Midi, à Toulouse (1760-1763) (ϕ_{43}, p. 123), de Carbonne, sur la Garonne (1764-1780), de Gignac (I, p. 103). — De Dartein : *loc. cit. renvoi 11*. Vol. III.

100. — Neuilly (1768-74) (ϕ_9, p. 109,-f_9), Luxembourg (II, p. 67), Amidonniers (I, p. 193).

101. — Blois (1716-1724) (f_{10},-ϕ_4, p. 107).

102. — On en a un peu abusé (Ponts de Roanne, de Chalonnes, etc...).

103. — Luxembourg (II, p. 67), Fontpédrouse (ϕ_1, p. 88 bis), La Croix (ϕ_3, p. 78). — Voir Appendice, - Viaducs.

104. — Entraygues (ϕ_5, ϕ_6, p. 34), Tournon (II, p. 35), Claix (III, p. 36).

105. — Passages supérieurs : lignes de Lyon à Marseille, de Mende à Séverac, de Marvejols à Neussargues.

106. — Date de la photographie : août 1908.

§ 2. — *PARAPETS*

Art. I. — Parapets pleins. — Sur un pont un peu long, un parapet à profil constant est monotone : on peut l'accidenter de dés en saillie, faire des encadrements de pierres de différentes couleurs, des panneaux de briques, etc...

Sur la paroi extérieure, on peut dessiner une « poste » (Φ_{23}), une grecque, plus ferme (Φ_{24})[107].

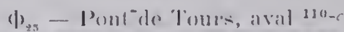
Φ_{23} — Pont de Saumur[108, 110-a]



Φ_{24} — Pont de Brunoy[109, 110-b]



A Saumur, sur la Loire (1756-1770) (Φ_{22}), à Tours (1764-1777) (Φ_{25}), à Saumur, sur le Thouet (Pont Fouchard) (1773-1784) (Φ_{26}), de Voglie a adopté une disposition originale, intéressante, imitable :



Φ_{25} — Pont de Tours, aval[110-c]



Φ_{26} — Pont Fouchard[110-c]



Une large bande plate court d'un bout à l'autre du pont, embrassant corniche et parapet : elle s'appuie au droit de chaque pile sur une table verticale de même saillie. La bande et les tables font des

Φ_{27}[110-d]



107. — Voici (Φ_{27}) celle de la Promenade du Peyrou, a Montpellier (fin du XVIIIe siecle).

108. — De Dartein, *loc. cit. renvoi 11*, vol. II, p. 69.

109. — Sur l'Yeres (1785-87) — Pont de Perronet — *id.*, p. 193.

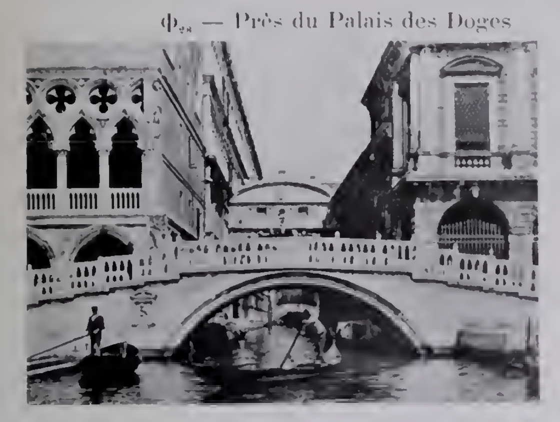
110. — Dates des photographies : *a*, août 1907 ; *b*, avril 1914 ; *c*, août 1907 ; *d*, juin 1914.

cadres rectangulaires contenant chaque arche, en manière « *d'arcade renfoncée* »[111].

Art. 2. — Parapets évidés. — Un parapet plein au-dessus d'une plinthe ne se comprend guère : un attique doit être et paraître léger.

Ponts à Venise [114-a]

Φ_{28} — Près du Palais des Doges



Φ_{29} — Pont du Rialto



On couronne très heureusement un pont par une file de balustres[112], interrompue par des dés pleins[113].

Φ_{30} — Pont de la Concorde, à Paris (1786-91)[114-b]



Les balustres du pont de la Concorde sont d'un joli dessin, bien ferme.

111. — De Dartein, *loc. cit. renvoi 11*, Vol. II : Notice sur Jean de Voglie, p. 67 ; Pont de Tours, p. 117 ; Pont Fouchard, p. 159.

112. — Il faut très peu de vide entre les panses.

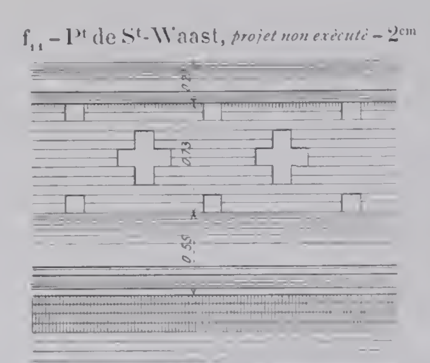
113. — Luxembourg (II, p. 68 ter, Pl_1, f_4).

114. — Dates des photographies : *a*. juin 1908 ; *b*. juillet 1902.

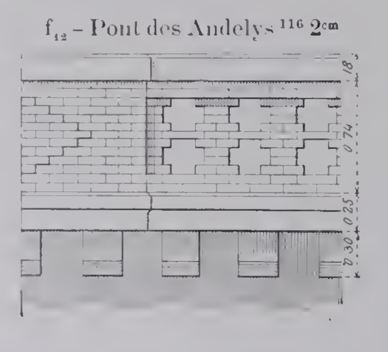
On ajoure très facilement un parapet en briques : petits piliers [115], fût troué de vides (f_{11}, f_{12}). Il y faut un peu de goût : on en a quelquefois manqué.

Si le pont est étroit, par exemple sous chemin de fer à une voie, et si l'on est à son niveau, on voit, à travers les jours du parapet d'une face, les pleins de l'autre.

f_{11} – P^t de St-Waast, *projet non exécuté* – 2^cm

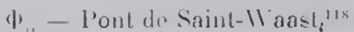


f_{12} – Pont des Andelys [116] 2^cm



Un ouvrage avec un parapet trop léger en métal ne paraît pas couronné du tout : on ne perçoit qu'un « grisé », — et des dés, s'il y en a.

Il faut étoffer les garde-corps en métal [117].



Φ_{11} — Pont de Saint-Waast [118]



§ 3. — *REFUGES*

Il n'est pas aussi facile qu'il semble de disposer, sans dommage pour l'aspect, des refuges dans un parapet : il y faut quelque étude.

On ne peut accepter des refuges pleins que dans un parapet très étoffé.

Un dé plein est bien placé sur un contrefort, sur un pilastre surmontant un bec, sur des voûtains ou des consoles en pierre (Φ_{31}, f_{13}).

Si le garde-corps est léger, le mieux est de le conserver pour les niches, mais un peu plus nourri, et de le soutenir par des corbeaux discrets.

115. — Antoinette (II, p. 145) ; — Saint-Waast (Φ_{31}) : voir renvoi 32, p. 105.

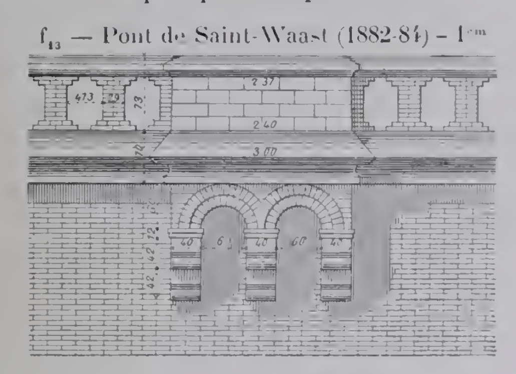
116. — Sur la Seine, 1872-73. — Voir p. 61, renvoi 54.

117. — Pont de l'Université, à Lyon.

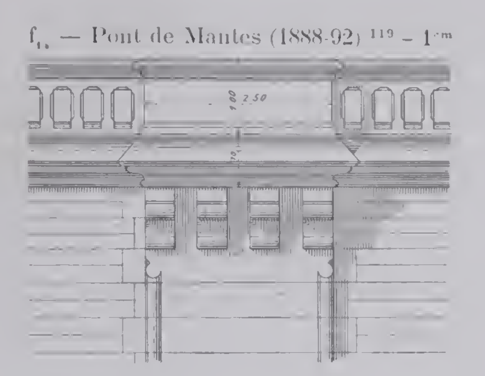
118. — Cliché Terpereau, Bordeaux.

Voici quelques dispositifs :

f_{13} — Pont de Saint-Waast (1882-84) - 1cm

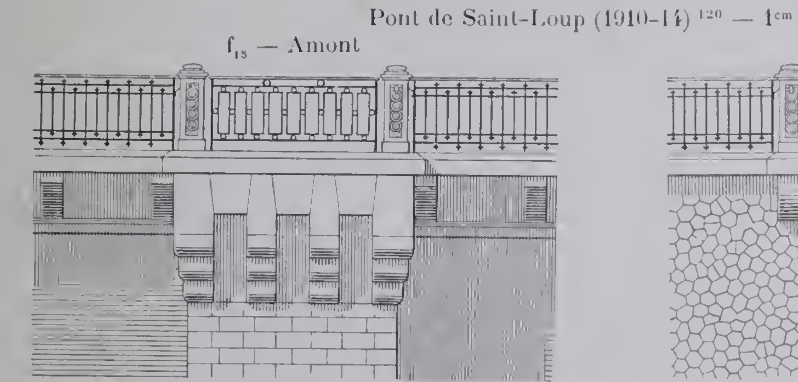


f_{14} — Pont de Mantes (1888-92) [119] - 1cm

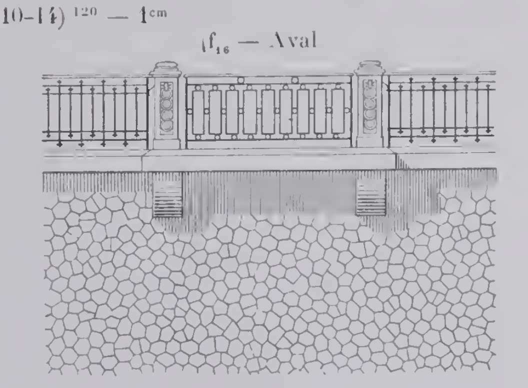


Pont de Saint-Loup (1910-14) [120] — 1cm

f_{15} — Amont



f_{16} — Aval



Au Pont-Neuf, on a appuyé des niches rondes sur des becs pointus (Φ_{32}).

Φ_{32} — Pont-Neuf, à Paris (1578-1607) [121]



119. — Sur le bras navigable de la Seine. « *Monographie de la ligne d'Argenteuil à Mantes* ». M. Bonnet, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Paris, Dunod, Atlas, Pl. IX.

120. — Voir renvoi 21, p. 33. 121. — Date de la photographie : juillet 1902.

§ 4. — *STATUES SUR UN PONT*


Φ33 — Pont de Wurzbourg [121 a]



Pour être vues avec lui, elles doivent être à son échelle, c'est-à-dire énormes.

Pour être vues des gens qui passent sur le pont, elles doivent être à l'échelle des passants, c'est-à-dire n'être pas beaucoup plus grandes qu'un homme [122].

De petites statues, à bonne échelle de près, sont trop petites vues avec le pont ($Φ_{33}$) [122]. De grandes, à bonne échelle de loin, sont écrasantes de près [123].

Il n'est donc pas possible de placer sur un pont des statues, à voir à la fois des rives et du pont : il faut choisir.

Pont des Belles-Fontaines (1728), (sculptures de Guillaume Coustou). — Aval [121 b]

Φ34 — Ensemble



Φ35 — Détail



122. — Pont Saint-Ange à Rome (Φ1, p. 103); Vieux Pont de Prague (Φ3, p. 106); Trittenheim (III, p. 276)

123. — Les socles posés sur les colonnes du pont de la Concorde attendent depuis plus de cent ans d'avoir quelque chose à porter. Au lieu des pyramides de Perronet, en métal, creuses, à faces ajourées, on songea à y placer des statues de grands hommes. Douze étaient en place en 1836, mais elles écrasaient le pont. On les envoya à Versailles faire cortège à celle de Louis XIV.

124. — Dates des photographies : *a*, juillet 1909 ; *b*, mai 1907.

On peut placer de grandes statues sur les becs des piles, les passants ne les voient pas [125], ou encore aux entrées élargies des ponts, sur de hauts piédestaux [126].

Les statues doivent être du style du pont : on se gardera de placer des marbres du XVIIIe siècle sur un vieux pont [127].

On n'a pas fait cette erreur au pont des Belles-Fontaines [128] (Φ_{34}, Φ_{35}).

On peut trouver des motifs de décoration n'ayant pas, comme une statue, des dimensions obligées, une échelle propre, par exemple, les obélisques qui couronnent très heureusement le pont du Midi, sur le Rhône, à Lyon (Φ_{36}).

Φ_{36} — Pont du Midi, à Lyon (1889-91) [131-a]



Ils chargent, comme il convient, les pilastres qui prolongent les becs, et séparent les arches. Au pont voisin de l'Université, les pilastres ne portent que des candélabres : maigre charge sur cette large base.

§ 5. — *INSCRIPTIONS COMMÉMORATIVES*

Φ_{37} — Pont Cestius, à Rome (20 av. J.-C.) [131-b]



On a souvent inscrit la date de construction, les noms des souverains, des auteurs des ponts, sur des piédestaux [129], des colonnes, dans des cartouches, aux abouts des ponts [130], au sommet des arches (Pont Fabricius, à Rome), sur une partie surélevée de la face intérieure du parapet (Pont de Rimini, Pont Cestius, à Rome, Φ_{37},....)

125. — Alma (I, p. 153), Invalides (Φ_{13}, p. 113), Mirabeau,....

126. — Iéna, Saints-Pères.

127. — Wurzbourg (Φ_{33}).

128. — Sur l'Orge, près de Juvisy (1728). — De Dartein, *loc. cit. renvoi 11*, Vol. II, p. 107 à 116, Pl 7 à 10.

129. — Pont des Belles-Fontaines (Φ_{33}).

130. — Pont Alexandre III, à Paris.

131. — Dates des photographies : *a*, juin 1909 ; *b*, août 1908.

CHAPITRE V

CULÉES. — ABORDS

Art. 1. — Abords. — Aux ponts des grandes villes, il faut d'amples abords. On trouvera de beaux modèles dans les ponts du XVIIIe siècle, les grands (Φ_{38}, Φ_{39}), les petits (Φ_{42}, Φ_{43}).

Φ_{38} — Pont de Tours, aval [133, 141 a]



Φ_{39} — Pont de Neuilly [134, 141-b]



On peut ébraser la dernière arche par une trompe [135], une voussure en pendentif (Φ_{38}).

Les tours rondes de Lavaur [136], de Turin [137], encadrent bien la grande voûte, mais conduisent mal la circulation.

Φ_{40} — Pont de Chantilly [141-c]



Φ_{41} — Pont d'Austerlitz [141-d]



Les courbes de Vizille [138], de Chantilly (Φ_{40}), d'Austerlitz (Φ_{41}), de Luxembourg [139], des Amidonniers [140], « entonnent » bien mieux la circulation dans le pont, résistent bien à la poussée des terres, font de belles lignes d'ombre.

133. — Voir p. 116 : Φ_{25} et renvoi 110.
134. — Voir p. 109 : Φ_{9} et renvoi 59.
135. — Pont-Royal, à Paris. 136. — I, p. 97.
137. — III, p. 199. 138. — I, p. 93.
139. — II, p. 67. 140. — I, p. 193.
141. — Dates des photographies : *a*, août 1907 ; *b*, août 1901 ; c, juillet 1903 ; *d*, juin 1901.

Φ_{42} — Pont Montaudran, à Toulouse [132]



Φ_{41} — Pont des Minimes, à Toulouse (1760-63) [132]



132. — Sur le Canal du Midi. — Date des photographies : juillet 1902.

Art. 2. — Têtes ou Portes de pont. — Il y avait des têtes de pont à Toulouse; il y en a au pont Flavien, sur la Touloubre, près de Saint-Chamas (Φ_{44}); au pont Valentré à Cahors (Φ_{45}), à Prague; il en reste à Châtellerault [141 bis].

Les Allemands en élèvent à l'entrée de leurs grands ponts métalliques [142].

C'est une intéressante décoration : on y pourrait revenir dans les grandes villes.



Φ_{44} — Pont Flavien



Φ_{45} — Pont Valentré (XIIIe)



Tout au moins peut-on annoncer le pont par des pyramides, des obélisques [143].

CHAPITRE VI

TOURS, OBÉLISQUES, SUR UN PONT

Φ_{46} – Pont d'Orthez (XIIe) [116-a]



Φ_{47} – Pont de Blois [116-b]



On a élevé quelquefois sur les ponts, des tours, probablement pour défendre le passage (Φ_{45}, Φ_{46}), un obélisque, une aiguille au sommet d'un dos d'âne (Φ_{47}) [144, 145].

141 bis. — Les deux tours de l'entrée rive gauche encadraient un joli bâtiment achevé en 1611 par René Androuet du Cerceau. On l'a démoli en 1824 : il ne laissait qu'un accès de 2m 92 à un pont de 21m.

Loc. cit. renvoi 65 bis, p. 109.

142. — Ponts sur le Rhin : de Bonn (1896-1898), de Worms (1898-1900), de Ruhrort-Homberg (1904-1907), de Cologne (1911),....

143. — Pont de Pont-Sainte-Maxence, sur l'Oise (voir p. 68, renvoi 25); Pont Alexandre III.

144. — Moulins (projet de Mansart), III, p. 306, f_1, f_2.

145. — Le pont construit fin du XVIIIe siècle, sur l'Oise, à Compiègne (3 anses de panier de 21m et 23m), portait, sur la clef de l'arche centrale, un obélisque surmonté d'une croix.

Belidor. « *Architecture hydraulique* », seconde partie, Tome II, Paris, MDCCLXXXX. Pl. LVII, p. 480.

146. — Dates des photographies : *a*, octobre 1909; *b*, avril 1914.

CHAPITRE VII

PONTS COUVERTS

Pont de Pavie (XIVe) [149]

Φ48 — Ensemble



Φ49 — Chaussée



Φ50 — Pont des Soupirs, à Venise [149]



On n'en fait plus. Pourquoi ?

Un pont peut, cependant, porter quelque chose (Φ50) [147].

Il y a plusieurs étages de circulation sur les grands ponts suspendus de New-York, sur le pont métallique de Passy.

On en peut concevoir sur les ponts en maçonnerie [148].

147. — Chenonceaux. — Projet de Palladio, pour le Pont du Rialto, à Venise. *(Loc. cit. renvoi 32, p. 93.)*

148. — Au Point-du-Jour, à Bercy, les étages de circulation ne sont pas superposés.

149. — Date des photographies : juin 1908.

CHAPITRE VIII

ÉTUDIER LES PONTS FRANÇAIS DU XVIIIE SIÈCLE [150]

On ne saurait assez étudier les ponts français du XVIIIe siècle : il y a là mieux et plus qu'un simple intérêt historique.

Sans doute, on ne fonderait plus sur pilotis les grands ponts de la Loire, ni par épuisements sous 26 pieds d'eau les piles-culées du Pont de Gignac ; sans doute, on ne construira plus de grandes voûtes sur les cintres flexibles de Perronet.

Ce ne sont là que procédés d'exécution : ils ont passé, comme les coches d'eau et les chaises à porteur.

Mais ce qui n'a point vieilli, c'est la beauté et la variété des formes de nos vieux ponts, le choix judicieux de leur décoration ; c'est l'ampleur, c'est la majesté solennelle de leurs accès : on ne les a pas égalées.

150. — On lira avec le plus grand profit les excellentes « *Études sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIXe siècle* », par M. de Dartein, — Paris, Béranger, 1907.

LIVRE II

COMMENT ON EXÉCUTE

UN PONT EN MAÇONNERIE

FONDATIONS — CINTRES — VOÛTES

FONDATIONS

§ 1. — *COMMENT ET SUR QUEL SOL ON A FONDÉ LES GRANDES VOUTES*[1]

Art. 1. — Piles

Les voûtes articulées sont en italiques.

Fondations — Procédé	Fondations — Sol	Ponts :	Intrados Voie portée	Tome	Voir pages — Tableau synopt.	Voir pages — Monographie	Dates	Plus grande portée	Profondeur MAXIMA sous l'étiage	Pression admise sur le sol de fondation — MAX.	Pression admise sur le sol de fondation — moy.
Épuisements dans des batardeaux	Rocher	Victoria	Â Fr	II	198	201	1836-38	48m77	7m31 sous le thalweg	36k	
	Calcaire fissuré	*Hochberg*	Ā rte	IV	166	177	1899-1901	40			
	Mollasse (tuf)	Amidonniers	EE rte	I	188	193	1904-07	46	5.29	6.4[2]	
		Cornelius			166	180	1902-03	44	6.6	4.9	3k7
		Reichenbach			168	183	1902-03	44	7.2	5.5	
	Marne	*Maximilien*	Ā rte	IV	168	192	1903-05	45.87	5	5.5	
		Wittelsbach			170	199	1904-05	44	5	4.1	
		Moulins-lez-Metz			170	202	1904-05	44		5	
	Argile	Edouard VII	E rte	I	144	182	1901-03	40.54	4.88	2.7	
Pilotis		Londres[3]	E rte		138	147	1824-31	46.33			
	Argile	Alma		I	138	153	1854-55	43			
		Big Muddy River	E Fr		222	225	1901-03	42.67			
		Gross-Kunzendorf	Ā rte	III	232	267	»	40			
	Sable argileux affouillable	Boucicaut	Ā rte	III	230	243	1888-90	40		3.3	
Havage	Rocher	Mehring	Ā rte	III	230	252	1903-04	46			
	Argile	Putney			230	239	1882-83	43.89			
	Gravier	*Garching*	E Fr	IV	92	95	1907-08	44.35	6.30	4.3	
Béton immergé	Poudingue	Mantes	E rte	I	140	160	1873-75	40	6		
		Nogent-sur-Marne	C Fr	I	76	79	1855-56	50	8.50		7.1
	Gravier	Pont-sur-Yonne	E aq	I	210	213	1870-73	40			
		Mannheim (RD)	Ā rte	IV	172	206	1905-08	59.50			
Air comprimé	Schiste	Empereur-François	E	I	140	168	1898-1901	42.34	10.55	9.8	
	Calcaire	Avignon	Ā	III	234	270	1905-09	40	14.03	12.3	
		Valence	E	I	142	173	1901-05	49.20	14.56		6.5
	Marne	Orléans	Ā rte	III	232	255	1904-06	43.85	18.60	9.4[4]	
		Avignon	Ā	III	234	270	1905-09	40	15.01		
	Argile	Verdun-sur-le-Doubs	E	I	140	165	1895-97	41	6.18		3.6
	Gravier	Avignon		III	234	270	1905-09	40	16.34		
		Mannheim (RG)	Ā	IV	172	206	1905-08	59.50	5		

1. — Faute de renseignements, on n'a pas indiqué aux Tableaux, Art. 1 et 2, toutes les voûtes de 40m ou plus.
2. — Sous les culées : 8k 9.
3. — Aux culées, on a incliné les pieux.
4. — Sous les culées : 17k 3.

Art. 2. — Culées[5]

Les voûtes articulées sont en italiques.

Fondations — Procédé	Fondations — Sol	Ponts :	Intrados Voie portée	Tome	Voir pages — Tableau synopt.	Voir pages — Monographie	Dates	Plus grande portée	Profondeur MAXIMA sous l'étiage	Pression admise sur le sol de fondation — MAX.	moy.
à sec	Gneiss	Cinuskel	$\overset{\frown}{A}^1$ fr	II	178	189	1910-12	46m98		22k9	20k
		Plauen	$\overset{\frown}{A}^1$ rte	III	14	52	1903-05	90		23.9	
		Gravona	$\overset{\frown}{A}^1$ fr	II	178	183	1884	43.53		14	
		Gour-Noir			80	103	1888-89	62		9.8	
	Granit	Gutach	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	III	84	122	1899-1900	64			
		Schwändeholzdobel			84	126	1899-1900	57			
		Langenbrand			88	152	1907-09	59		5.6	
	Micaschiste dur	Castelet	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	II	116	130	1882-83	41.20			
	Schiste cristallin	Solis	C^1 fr	I	52	55	1901 02	42		9.8	
	Schiste	Tuoi	$\overset{\frown}{A}^1$ fr	II	180	194	1911-12	47.71		22.9	20
	Grès	Guggersbach	$\overset{\frown}{A}^1$ rte	III	14	59	1906	50.20		5	
		Wiesen	E^1_h fr	I	232	235	1907-09	55		8.6	
	Calcaire	Escot	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	II	122	174	1907-09	56		14.3	
		Wallstrasse	$\bar{A}^1$ rte	IV	124	143	1904-05	65.45		8	
		Montanges	$\overset{\frown}{A}^1$ rte	III	16	62	1908-09	80.29			
	Mollasse (tuf)	Lavaur	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	II	118	135	1882-84	61.50	2m87	6.7	5.9
		Antoinette			118	145	1883-84	50	4.80	6.4	6.4
	Moraine glaciaire	Brent	C^1 rte	I	12	34	1899-1900	44			9
	Éboulis très compacts	Steyrling	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	III	86	137	1904-05	70		7.5	
	Éboulis compacts	Palmgraben	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	II	120	164	1904-05	49			
		Schalchgraben			120	168	1904-05	52			3.5
		Salcano	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	III	86	141	1904-06	85			4
	Éboulis peu compacts	Krenngraben	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	III	86	134	1904 05	40		3.5	
	Terre et pierrailles	Seythenex (RG)	$\overset{\frown}{A}^n$ rte	III	170	177	1908-11	41.19		2	
Épuisements dans des batardeaux	Granulite	*Göhren*	$\bar{A}^1$ rte	IV	124	139	1903-04	60	7.5	8.9	8.2
	Schiste dur	Oloron (RG)	C^1 Fr	I	38	45	1881-82	40	3		
		Rocky River	$\overset{\frown}{A}^1\overset{\frown}{A}^1$ rte	II	62	95	1908-10	85.34	7.31	7.5	6.5
	Schiste tendre	Fium' Alto	E^1 rte	I	88	110	1862-63	40	2.55		
	Grès	Teinach	$\bar{A}^1$ rte	III	192	203	1882	46	8	5.5	
		Höfen		IV	38	41	1885	41	2	9	
	Tuf	Gignac	E^1 rte	I	86	103	1776-1810	48.42	9		
		Lusserat (RG)	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	III	88	155	1908-10	45.70		10	6.4
	Conglomérat solide	Krummenau	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	III	90	164	1910-11	63.26		12	
		Illerbeuren	$\bar{A}^1$ Fr		156	159	1893-94	59	4.80	3.4	
	Marne dure	*Prince-Régent*	$\bar{A}^1$ rte	IV	222	239	1900-01	63	6	4.8	
		Max-Joseph			222	242	1901-02	64	6.10	5	
	Argile	Diable (RG)	E^1 rte	I	88	116	1871-72	55	5.52	7.2	2.6
		Putney	$\bar{A}^n$ rte	III	230	239	1882-83	43.89			
		Gloucester	E^1 rte	I	86	107	1826-27	45.72			
		Nydeck (arrière de la culée RD)	$\overset{\frown}{A}^1$ rte	II	12	51	1840-44	45.90			
	Gravier	Calcio	$\overset{\frown}{A}^1$ Fr	III	80	100	1877-78	42	4.20		
		Inzigkofen (RG)	$\bar{A}^1$ rte	IV	220	225	1895	47.90		3.7	
		Mannheim (RD)	$\bar{A}^n$ rte	IV	172	206	1905-08	59.50			
		Gräveneck	$\overset{\frown}{A}^1$ rte	IV	210	213	1911-12	48		4.5	
	Sable et rognons de tuf	Alma (RG)	E^n rte	I	138	153	1854-55	43	0.30		

5. Les seuls ponts à plusieurs arches indiqués dans ce tableau sont ceux pour lesquels les culées sont fondées autrement ou sur autre sol que les piles.

Fondations: Procédé	Fondations: Sol	Ponts :	Intrados Voie portée	Voir: Tome	Voir pages: Tableau synopt.	Voir pages: Monographie	Dates	Plus grande portée	Profondeur MAXIMA sous l'étiage	Pression admise sur le sol de fondation: MAX.	Pression admise sur le sol de fondation: moy.
Pilotis	Argile	Diable (RD)	E^1 rte	I	88	116	1871-72	55m		7k2	2k6
		Verdun-sur-le-Doubs	E^n rte	I	140	165	1895-97	41			2.9
	Gravier	*Munderkingen (RG)*[6]	$\bar{A}^1$ rte	IV	52	55	1893	59		3	2.1
		Mannheim (RG)	$\bar{A}^n$ rte	IV	172	206	1905-08	59.50			
		Garching	E^n Fr	IV	92	95	1907-08	44.35	3m28	3.2	
	Sable	Empereur-François	E^n rte	I	140	168	1898-1901	42.34			
	Sable mouvant	Chester (arrière de la culée RD)	$\widehat{A}^1$ rte	III	10	29	1833-34	60.96			
	Glaise et boue glaciaire	*Coulouvrenière (RG)*[6]	$\bar{A}^n$ rte	IV	78	81	1895-96	40		3.2	
		Vizille	E^1 rte	I	86	93	1751-66	41.08			
		Mantes	E^n rte	I	140	160	1757-65	40			
		Victoria	$\widehat{A}^n$ rte	II	198	201	1836-38	43.89			
		Mosca	$\bar{A}^1$ rte	III	192	199	1834	45		3	
		Wengern			192	207	1904	50			
		Ziegenhals			194	208	1905	40			
		Schwusen[6]			194	213	1907	48			
		Kupferhammer[6]			196	214	1907	48			
		Krappitz[6]	$\bar{A}^n$ rte	III	232	265	1905	50			
Air comprimé	Calcaire	Avignon (RD)	$\bar{A}^n$ rte	III	234	270	1905-09	40	6		
	Craie tuffau	Lusserat (RD)	$\widehat{A}^1$ Fr	III	88	155	1908-10	45.70	12.80	10	6.4
	Marne	Verdon	E^1 Fr	I	128	133	1905-06	40	13.22	14	8
		Avignon (RG)	$\bar{A}^n$ rte	III	234	270	1905-09	40	13.10		
	Gravier	Collonges (RG)	C^1 rte	I	10	31	1869-73	40	6		
		Valence	E^n rte	I	142	173	1901-05	49.20	6.85	8.7	

Art. 3. — Ce qu'indiquent les tableaux précédents.

— On a fondé de grandes voûtes par tous les procédés, et à peu près sur tous les sols.

On fonderait aujourd'hui à l'air comprimé la plupart des ponts qu'on a fondés sur pilotis[7] ou sur béton immergé[8].

§ 2. — *IL FAUT AUX GRANDES VOUTES DES APPUIS INVARIABLES*

Il faut aux grandes voûtes des piles qui ne s'enfoncent pas, des culées qui ne s'enfoncent pas, qui ne reculent pas.

Sur les sols compressibles, on étale souvent la pression par des dalles en béton armé[9].

Sur un sol douteux, il est délicat, il peut être imprudent de faire une grande voûte.

6. — On y a incliné les pieux.

7. — Londres (I, 147); Alma (I, 153);....

8. — Nogent-sur-Marne (I, 79);....

9. — Walnut-Lane (II, 89); Palmgraben (II, 165); Schalchgraben (II, 169); Krenngraben (III, 135); Steyrling (III, 86); Salcano (III, 143); Seythenex (III, 178); Wengern (III, 207); Ziegenhals (III, 208); Krappitz (III, 265); Gross-Kunzendorf (III, 267).

Nous avons fait ainsi à 3 piles du viaduc de Morez (ligne de Morez à Saint-Claude, 1909-11). — Voir p. 48, renvoi 30.

TITRE II

CINTRES[1]

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

§ 1. — *BOIS. — ASSEMBLAGES*

Art. 1. — Choix des bois. — Généralement, on fait en chêne les pièces très chargées, ou qui le sont perpendiculairement à leurs fibres : semelles sur et sous les appareils de décintrement, chapeaux des palées doubles, sommiers d'une poutre armée[2], clefs des traits de Jupiter, coins, pistons des boîtes à sable ; — en pin ou sapin, les autres[3].

On a quelquefois employé des bois en grume : pour tout le cintre[4], pour les étages inférieurs seulement[5].

Art. 2. — Ne pas trop presser le bois normalement à ses fibres. — Le bois résiste mal aux compressions transversales[6, 7].

On n'y a pas toujours assez pris garde[8].

Pour empêcher qu'une pièce ne s'enfonce dans une autre, on intercale entre elles une feuille de zinc[9] ou de tôle[10].

Art. 3. — Assemblages des bois. — On assemble les pièces des cintres surtout avec des boulons, des équerres, des étriers, des plaques de tôle. Ces assemblages sont très simples, peuvent résister à la traction, réduisent la main-d'œuvre et les déchets.

Les couvre-joints en tôle de 5^{mm} à 7^{mm}, boulonnés, font des assemblages très rigides et solides.

1. — Dans tout ce titre, quand, à la suite d'un pont à voûtes de 40^m ou plus, il y a 2 pages citées, la 1re est celle du tableau synoptique, la 2e, celle de la monographie.

2. — Castelet (II, 117, 132) ; Luxembourg (II, 61, 72 bis).

3. — Étaient en châtaignier les cintres des ponts Annibal et du Diable (I, 89) ; en peuplier, quelques pièces secondaires au pont des Bains de Lucques (III, 11, 33).

4. — Annibal (I, 89) ; Diable (I, 89) : Guggersbach (III, 15, 61).

5. — Palmgraben (II, 121) ; Schalchgraben (II, 121) ; Krenngraben (III, 87).

6. — Viaduc de la Sitter. Expériences faites par la maison T. Bell, qui a construit la grande pile en bois sur laquelle on a monte la travée de 120^m.

Du sapin rouge, abattu en hiver un an avant l'emploi, s'est écrasé à 40^k, à 55^k par 0^m01^2.

Dans les calculs, on a admis comme effort-limite :

pression parallèle aux fibres : 80^k 0^m01^2 ;

pression normale : 12^k 0^m01^2.

Schweizerische Bauzeitung, 15 octobre 1910, p. 205 à 210 : « *Der Sitterviadukt der Bodensee-Toggenburgbahn* », von den Ingenieuren A. Acatos, L. Lüchinger, E. Ackermann.



ϕ_1 — 24 avril 1913



7. — Pour construire la ligne de Frasne à Vallorbe, on a dû dériver le Doubs en souterrain, sous une falaise : des longrines de 0^m30 d'épaisseur, coiffant les poteaux d'appui, ont été réduites à 0^m05 (ϕ_1).

8. — Pont Cornélius (IV, 182).

9. — Ponts du Castelet (II, 132), de Lavaur (II, 137), Antoinette (II, 146),....

10. — Pont du Castelet (II, 132) ; pont de Wiesen (I, 241).

Art. 4. — Ne pas tirer les assemblages des bois : les comprimer. — Une pièce de bois résiste bien à la compression et à la traction; mais les assemblages, eux, ne résistent bien qu'à la compression.

Dans un cintre bien étudié, sauf les vaux et les couchis qui sont fléchis, les pièces maîtresses des fermes travaillent de bout à la compression simple.

Pour une pièce très tendue, on emploiera un tirant en acier, — mieux, un câble dont on règle la tension.

§ 2. — *FERMES*

Art. 1. — Nombre et écartement. — Presque toujours, les fermes sont espacées d'environ 1m50; on écarte un peu plus celles de rive qui ne supportent que la moitié de la charge, et on en diminue l'épaisseur [11].

En général, il y en a :

4 pour un pont de chemin de fer à une voie (4m50 entre garde-corps);

6 pour un pont à deux voies (8m entre garde-corps);

3 pour un pont sous une voie étroite, — pour un pont-route de moins de 4m.

Art. 2. — Épaisseur. — Pour les grands cintres, 0m20 à 0m25 [11].

Art. 3. — Tracé. — On peut imiter ce qui a été fait, mais il faut se bien rendre compte de ce que portera chaque pièce.

On se gardera de placer des pièces au hasard : non seulement on paie du bois inutile, mais on fatigue les autres, et, quelquefois, on introduit dans les principales des efforts dangereux.

On peut avoir un très mauvais cintre avec beaucoup de bois.

Art. 4. — Vaux. — Un vau haut se fait en deux [12], en trois pièces [13], bien boulonnées.

Solidement assemblés entre eux par des plaques de tôle, des vaux hauts sont comme les voussoirs d'une voûte de bois [14].

§ 3. — *PIÈCES TRANSVERSALES*

Art. 1. — Contreventement. — On contrevente chaque ferme dans son plan par des moises longitudinales, des écharpes; mais ce sont surtout les fermes entre elles qu'il faut solidement contreventer.

Elles sont calculées et construites comme devant rester dans un plan vertical : il faut les y maintenir, c'est-à-dire les empêcher de se voiler, de gauchir, de flamber.

11. — Voir plus loin les tableaux synoptiques, p. 136 à 141, p. 144, 145, 148.

12. — Antoinette (II, 144 bis); Sornin (p. 146, art. 3).

13. — Castelet (II, 132); Ramounails (II, 187).

14. — Ramounails (II, 188). L'arc des vaux a pris la moitié de la charge sur le cintre.

Un grand cintre étroit peut flamber : il faut le contreventer à outrance[15].

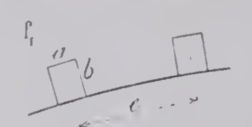
Les croix de Saint-André font un excellent contreventement, à condition que les deux bras de la croix ne soient ni trop fermés, ni trop ouverts ; on contrevente aussi par de simples écharpes, par des moises horizontales.

On ne calcule pas les pièces de contreventement : le sens pratique, c'est-à-dire le bon sens, indique leur place et leurs dimensions.

Quand on doute, il vaut mieux en mettre trop, mettre les pièces plus faibles et les multiplier.

Art. 2. — Couchis.

— Pour les moyens ouvrages, on pose jointifs des madriers de 7 à 8ᶜ d'épaisseur ou des poutrelles carrées.



Pour les couchis des grands, on prendra : $\frac{a}{b} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, soit $\frac{5}{7}$[16].

Avec ce rapport, on a la résistance maxima d'une pièce fléchie découpée dans un bois rond : j'ai presque toujours pris 10ᶜ et 14ᶜ.

On calcule l'espacement e des couchis suivant l'écartement des fermes et la charge.

Art. 3. — Platelage.

— On cloue sur les couchis, à angle droit sur eux, des voliges minces jointives de 2ᶜ à 2ᶜ 1/2.

Sur ce plancher continu, on trace les lignes d'assises, les courbes de tête, les queues des voussoirs de tête, la place des joints secs, l'épure d'un pont biais.

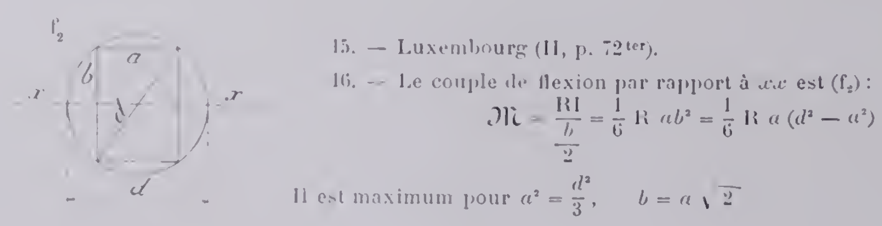
CHAPITRE II

CINTRES FIXES

C'EST-A-DIRE BIEN APPUYÉS SUR LE SOL ENTRE LES NAISSANCES

§ 1. — *QUELLES VOÛTES FAIT-ON SUR CINTRES FIXES ?*

Toutes celles pour lesquelles il est facile de prendre appui sur le sol, — spécialement les arcs et les ellipses surbaissés, qui, presque toujours, en sont près.



15. — Luxembourg (II, p. 72 ter).

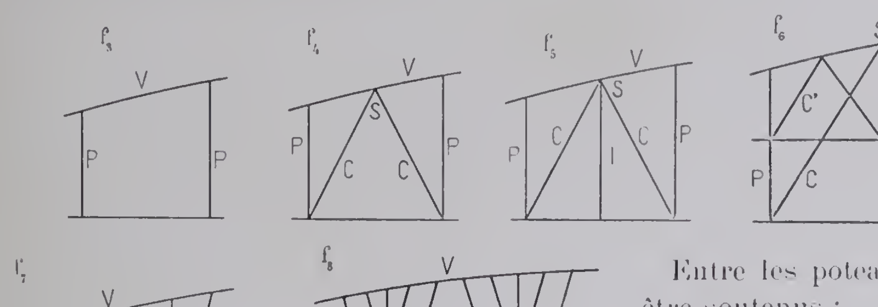
16. — Le couple de flexion par rapport à xx est (f_2) :

$$\mathfrak{M} = \frac{RI}{\frac{b}{2}} = \frac{1}{6} R\, ab^2 = \frac{1}{6} R\, a\,(d^2 - a^2)$$

Il est maximum pour $a^2 = \frac{d^2}{3}$, $\quad b = a\sqrt{2}$

§ 2. — *ON PEUT CLASSER LES CINTRES FIXES SUIVANT LA DISPOSITION DES MAITRESSES PIÈCES SOUTENANT LA COURONNE DES VAUX*

Art. 1. — Cintres à poteaux. Type P. — Les vaux sont portés par deux poteaux verticaux P (f_3).

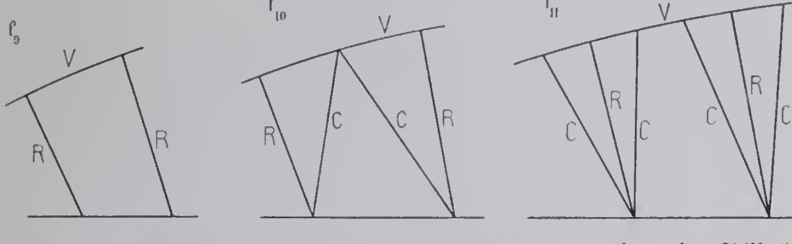


Entre les poteaux, ils peuvent être soutenus :

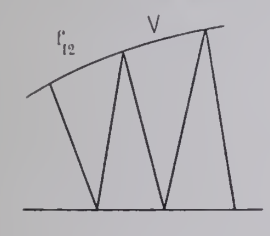
soit par des contrefiches concourantes (type poteaux et triangles PT, f_4, f_5, f_6) ; — le sommet S soutient ou le milieu d'un vau, ou l'about de deux vaux ; — on y peut suspendre un poinçon I qui porte une moise horizontale *m* ou plusieurs ; — il y a souvent deux systèmes de triangles CC' (f_6) ;

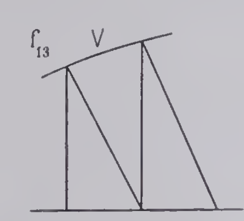
soit par des contrefiches isolées (type PC), — système unique (f_7), ou double (f_8) : elles travaillent isolément ; elles ne s'entr'aident pas.

Art. 2. — Cintres à rayons. Type R. — Les vaux sont portés par deux pièces R, dirigées suivant le rayon de l'intrados (f_9).



Entre les rayons R, ils peuvent être soutenus par des contrefiches, soit concourantes (type rayons et triangles RT, f_{10}), soit isolées (RC, f_{11}).



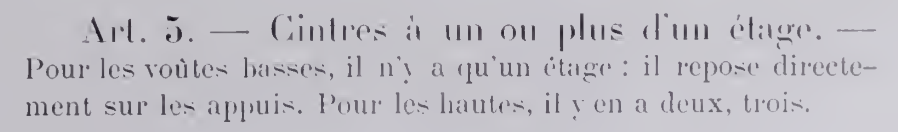


Art. 3. — Cintres à treillis. — On en a fait en W (f_{12}), en N (f_{13}).

Art. 4. — Cintres à contrefiches rayonnant de piles provisoires (f_{14}). — A partir de piles provisoires, on a étalé en éventail des contrefiches.



Mais il a fallu fonder ces piles : on ne comprend guère que sur elles on n'appuie pas un ouvrage à plusieurs arches.



Art. 5. — Cintres à un ou plus d'un étage. — Pour les voûtes basses, il n'y a qu'un étage : il repose directement sur les appuis. Pour les hautes, il y en a deux, trois.

§ 3. — *CINTRES FIXES A POTEAUX* (P)

Intrados	Ponts :	Voir — Tome	Voir — page — Tableau synoptique	Voir — page — Monographie	Portée	Montée	Fermes — Épaisseur en 0m01	Fermes — Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle [17] — Cube de bois	Par m. q. de douelle [17] — Poids de fer	Par m. q. de douelle [17] — Dépense	A la clef en m/m — Surhaussement	A la clef en m/m — Tassement

Art. 1. — Poteaux seuls (P) et nombreux étages.

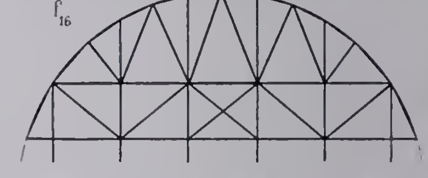
Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Épaisseur	Écartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Arcs peu surbaissés à grande flèche	Crespano	II	11	47	40m40	16m		1m40			48f60	530mm	370mm
	Walnut-Lane	II	63	88	70.71	21.41	25	1.524	1m³20	202k			95.3
									(les deux voûtes ont été construites sur le même cintre.)				

Art. 2. — Poteaux et triangles (PT).

A. — *Sans poinçons.*

1° — Un étage [18] (f₁₅).

Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Épaisseur	Écartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Ellipse	Signac	I	129	132	40	12.31	30	1.25	0.71	3	54.80		
Arcs assez surbaissés	Seythenex	III	171	179	39.66	10.05	20	1.25	0.63	11.1	63.50	50	29
	Losde [19]				30.60	6.30	20	1.40	0.486	7.61	28.50		
Arcs très surbaissés	Lays-sur-le-Doubs [20]				26	3.48			0.445	4.82	30.80		
	Arciat [20]				31	4.35			0.491	5.97	35.60		
	Digoin [20]				26	3.50	25-30	1.44	0.595	9.37	41.90		
	Morbegno [21]	IV	63	71	70	10	25	1.40				120	
	Andrézieux				36.45 / 33.30	4.70 / 4	rive 16 / inter^re 18	1.65	0.52	12.24	32		



2° — Deux étages [22] (f₁₆).

Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Épaisseur	Écartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Plein cintre	Rébuzo	I	39	49	40	20	25	1.57	0.80	17.3	31.90		22
Arc très surbaissé	Illerbeuren (articulé)	IV	157	160	59 / *57.16* entre rotules	*9.82*	ét^ge sup^r 20 / ét^ge inf^r 26	1.28	0.89		75.80	60	15 jusqu'au clavage

B. — *Avec poinçons.*

Un étage et deux systèmes de triangles (type Montlouis) (f₁₇).

Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Épaisseur	Écartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Ellipses	Bléré [23]				24	6.43	25		0.662	12.22	47.96		
	Chalonnes [24]				30	7.5	25		0.729	10.16			28 à 71
	Marmande				36	10	30		0.669	10.92	80.05		37 à 68
	Le Verdon	I	129	134	40	10	25	1.40	0.39	10	39.10	50	44
Arcs assez surbaissé	Claix	III	13	37	52	8.05	35	1.50	0.74		68.90		4
Arcs très surbaissés	Boucicaut	III	231	246	40	5	25	1.60	0.75	7.88	35.93		
	Argentat [25]				32.64	5.47	25	1.25	0.90	16.24	60.33		

17. — Voir à l'Avertissement, en tête des tomes I à IV, comment est calculée la surface de douelle.
18. — Pont sur l'Aude de la station de Saint Martin Lys (Ligne de Quillan à Rivesaltes, 1896-97) : portée, 34m ; montée, 8m 86.
19. — Sur l'Ariège (Ligne de Tarascon à Ax, 1882-83). 20. — Saône-et Loire. 21. — Deux systèmes de triangles (comme au croquis f₁₇).
22. — Plus de 2 étages : Pleins cintres de Nogent sur Marne (I, 77, 81), de Ballochmyle (I, 39, 42) ; arc assez surbaissé de Jamna (III, 83, 119).
23. — Sur le Cher (Route Nationale n° 76). 24. — Morandière : Montlouis, Pl. 130, fig. 1-2 ; Chalonnes, Nantes, Pl. 131, fig. 1.
25. — Route Nationale n° 120 de Rodez à Limoges (1893).

Art. 3. — Poteaux et contrefiches isolées (PC).

A. — *Un système unique de contrefiches.*

(2 par poteau) [26] (f_{18}).

f_{18}

Intrados	Ponts :	Voir Tome	Voir page Tableau synoptique	Voir page Monographie	Portée (Portée entre articulations)	Montée (Montée entre articulations)	Fermes: Épaisseur en 0m01	Fermes: Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle: Cube de bois	Par m. q. de douelle: Poids de fer	Par m. q. de douelle: Dépense	A la clef en m/m: Surhaussement	A la clef en m/m: Tassement
Ellipses	Ouroux				36m 38	8m02 8.80	20c	1m80	0mc435 0.432	5k19 5.02	30f80 30.15		
Ellipses	Big Muddy River	I	223	228	42.67	9.14	25	1.225				vte nord 38mm vte sud 20	42mm 33
Ellipses	Garching (voûte articulée)	IV	93	98	44.35 *38.55*	13.34 *7.23*	18	1.235			48.20	80	39
Arcs assez surbaissés (Ponts suisses)	Guggersbach	III	15	60	50.20	8.22		1.58	0.35	7.3	37.50	40	amt 30 aval 35
Arcs assez surbaissés (Ponts suisses)	Lichtensteig	III	89	162	42.82	11.54	22	1				80	40
Arcs assez surbaissés (Ponts suisses)	Krummenau	III	91	165	63.26	13.85	22	0.96	0.77	21.6	68.90	130	25
Arcs très surbaissés — Ponts allemands	Orléans	III	233	259	43.85	5.80	25	1.70	0.58	15.2	40.10		20 à 29
									Moyenne des 7 cintres, pieux compris				
Arcs très surbaissés — Ponts allemands	Mehring	III	231	252	46	6.17	20	1.18	0.62			100	70
Arcs très surbaissés — Ponts allemands	Trittenheim	III	235	277	46	6.17	20	1.17				100	
Arcs très surbaissés — Ponts allemands	Longuich	III	237	279	43	5.34	20	0.96	0.82	16		120	
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Göhren	IV	125	140	60 *60.56*	6.75 *6.80*	20	1.08 1.03 1	0.51			122	66
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Wallstrasse	IV	125	148	65.45 *57*	11.94 *5.80*	25	1.40	0.58		42.20	90	12
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Hochberg	IV	167	177	39.40 *40*	5.40 *5.40*	20	1.48	0.49	5.7	30.30	100	
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Cornelius	IV	167	181	44 *41*	*3.42*	24	2	0.71	5.5		120	45
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Reichenbach	IV	169	183	44 *41*	*4.10*	25	2	0.70	5.8		100	amt 48 aval 47
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Maximilien	IV	169	194	45.87 *41*	*4.90*	24	2	0.72	5.7		120	
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Wittelsbach	IV	171	199	44 *41*	*4.10*	25	2	0.70	5.71		120	40
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Inzigkofen	IV	221	226	47.90 *43*	8.30 *4.38*	16 18	1.07			18.70	153	amt 49 aval 43
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Neckarhausen	IV	221	233	59.40 *50*	12.585 *4.545*	18	1.30	0.35		21.90	200	amt 67 aval 78
Arcs très surbaissés — Ponts allemands — Articulés	Max-Joseph	IV	223	244	64 *60*	8 *6*	24	2.10	0.55	2.4	44.60	120	45

B. — *Deux systèmes de contrefiches.*

(1 par poteau) [27] (f_{19}).

f_{19}

Intrados	Ponts :	Voir Tome	Voir page Tableau synoptique	Voir page Monographie	Portée	Montée	Fermes: Épaisseur en 0m01	Fermes: Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle: Cube de bois	Par m. q. de douelle: Poids de fer	Par m. q. de douelle: Dépense	A la clef en m/m: Surhaussement	A la clef en m/m: Tassement
Ellipses	Annibal	I	89	113	55	14.02	bois ronds de 21c	1.32	0.54	3.3	66.20		260
Ellipses	Diable	I	89	117	55	13.55	bois ronds de 21 et 26c	1.30	0.58	4.5	57.50	130	65
Arc peu surbaissé	Céret	II	121	161	45	19.50	30	1.35	1.31	21.7	104.20	70	90

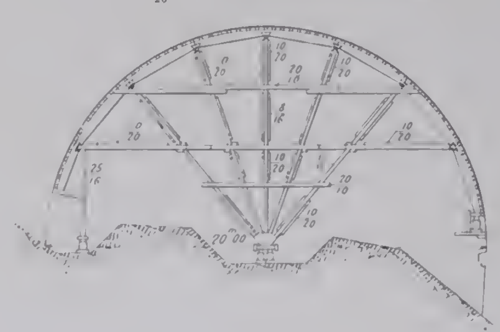
26. — Michelau, III, 195, 209; Schwusen, III, 195, 213; Neckargartach, IV, 169, 189; Grasdorf, IV, 125, 130; Gräveneck, IV, 211, 214; Sigmaringen, IV, 251, 255; Boberullersdorf, III, 287, 299; Cabin-John, III, 73, 76.

27. — Pont de Villefranche sur la Têt (1890, Ligne de Prades à Olette) : Portée, 39m346 ; montée, 17m.

§ 4. — *CINTRES FIXES A RAYONS* (R)

Art. 1. — Rayons seuls (R). — *A. — Type Saint-Waast (pleins cintres bas).* — On fait aboutir toutes les contrefiches à un seul support, comme des rayons de roues sur un moyeu (f_{20}, Φ_2).

f_{20} — Pont de Saint-Waast [28]



Φ_2 — Pont sur le Bachelard [29]



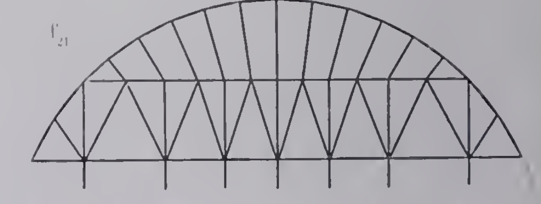
Intrados	Ponts :	Voir: Tome	Voir: page: Tableau synoptique	Voir: page: Monographie	Portée	Montée	Fermes: Épaisseur en 0m01	Fermes: Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle: Cube de bois	Par m. q. de douelle: Poids de fer	Par m. q. de douelle: Dépense	A la clef en m/m: Surhaussement	A la clef en m/m: Tassement
Pleins cintres	Saint-Waast [28, 31]				20m	10m	14c 16	1m50	0mc232	8k27	19f49		5mm
	Le Bachelard [29]				32	16	18	1.74	0. 346	15.35	33.04		
Arcs peu surbaissés	Luxembourg (voûtes latérales)				21.60	10.80	14 16	1.50	0. 30	14.39	44.29		
	Place Croizière [30]				30	10			0. 606	24.16	51.86		

B. — Type Lavaur

(Voûtes à grande flèche)

Plusieurs étages [32] (f_{21})

f_{21}



Intrados		Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Épaisseur	Écartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Plein cintre		Brent	1	13	35	44	22	25	1.50	0. 77	9.6	67		
Arcs	peu surbaissés	Lavaur	II	119	137	61.50	27.50	20 25	1.50	0. 66	22.8	76.90	0mm	18.7
		Escot	II	123	175	56	18.70	25	1.50	0. 52	16.3	135.70	35	40
		Eaux-Salées [33]				50	25	20 25	1.50	0. 70	20.8	112.32	0	31
	assez surbaissés	Gour-Noir	III	81	104	62	16.10	25	1.56	0. 71	28.6	79.20	30	14
		Steyrling	III	87	139	70	15.70	30×42	1.50	1. 72		83.30	250	130

28. — Ligne de Montauban à Castres, 1882-1884, voûtes de rive.

29. — Arche de 32m sur le Bachelard (Basses-Alpes), route nationale n° 210 (1901-1903); cintre étudié, en 190[illegible], sur la demande de M. l'Ingénieur en chef Zürcher. Même cintre à une arche de 3[illegible] m de la même route (1905-1907).

30. — Près Ardes-sur-Couze (Puy-de-Dôme)

31. — Mêmes cintres aux arches de rive du pont d'Amélie les Bains, sur le Tech, 26m (Chemin de fer d'Elne à Arles-sur-Tech, 189[illegible]-1892).

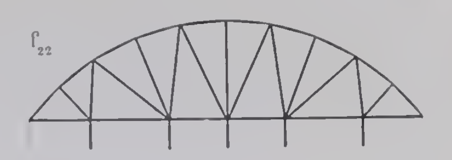
32. — Gutach (III, 124), Schwandeholzdobel (III, 127).

33. — Ligne de Miramas à l'Estaque. — Voir Appendice.

Art. 2. — Rayons et triangles (RT)

Type Antoinette [31]

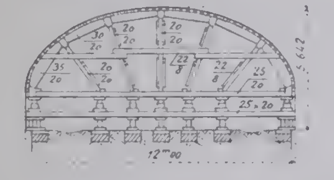
Un étage (f_{22})



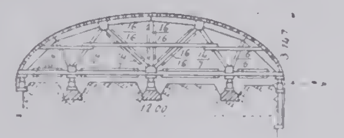
Intrados	Ponts :	Voir — Tome	Voir — page — Tableau synoptique	Voir — page — Monographie	Portée	Montée	Fermes — Épaisseur en 0m01	Fermes — Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle — Cube de bois	Par m. q. de douelle — Poids de fer	Par m. q. de douelle — Dépense	A la clef en m/m — Surhaussement	A la clef en m/m — Tassement
Ellipses [34-a]	Amidonniers — Voûtes — centrale — amont	I	189	199	46m	10m99	Fermes intermédiaires : 24c	1m90	0m354	13k5	51f40	30mm	36mm
	Amidonniers — Voûtes — centrale — aval								0.52	13.1	48.40	30	33
	Amidonniers — Voûtes — intermédiaire — amont				42	10.38			0.49	13.6	47.10	25	28
	Amidonniers — Voûtes — intermédiaire — aval								0.47	13.2	44.60	25	23
	Amidonniers — Voûtes — rive droite — amont				38.50	9.43	Fermes de rive : 20c		0.46	13.7	44.70	20	19
	Amidonniers — Voûtes — rive droite — aval								0.44	13.2	42.30	20	21
	les Calvets [35]				27	6.90	16 20	1.40	0.40 0.375	24.38	23.97		
	la Sampenne [35,36]				27	6.90	16 20	1.40	0.386	24.5			
	Belleperche [35]				33	8.20	16 20	1 40	0.416	21.3	44.24		
Arcs — peu surbaissé [21-b]	Antoinette	II	119	145	50	15.90	20 25	1.40	0.59	24.8	102.50	0	13
Arcs — très surbaissé	Saint-Loup [37]				33	4.40	18 20	1.65	0.45	23.5	45.76	30	40 à 50

Art. 3. — Quelques autres applications du type à rayons seuls (Saint-Waast, Lavaur), et à rayons et triangles (Antoinette). — Le type à rayons est très souple et s'ajuste à toutes voûtes. Exemples :

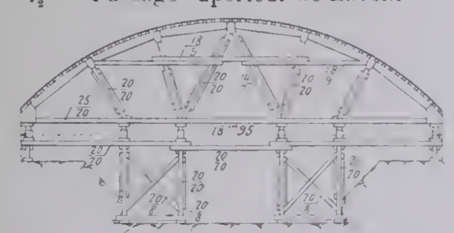
f_{23} — Passage supérieur de Corabeuf [38]



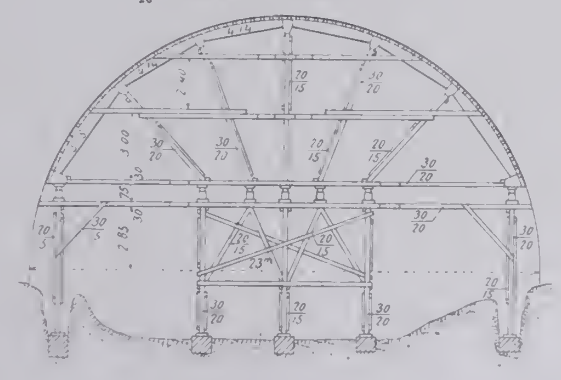
f_{24} — Viaduc des Roches-Avises [38]



f_{2} — Passage supérieur de Laveix [39-a]



f_{26} — Viaduc de Muratel [39-b]



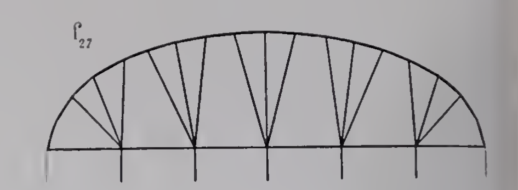
34. — Type Antoinette. Ponts en arc assez surbaissé de : Pouch (III, 111), Freyssinet (III, 112).
34-a. — Pont Saint-Pierre (I, 120). 34-b. — Pont de Wäldlitobel (II, 157) ; Pont Victoria (II, 205).

35. — Ligne de Castelsarrasin à Beaumont. 36. — On y a employé les cintres du viaduc des Calvets,

37. — Ligne de la Ferté-Hauterive à Gannat. 38. — Ligne d'Epinac à Dijon. (Voir Tome III, p. 333, renvoi 24.)

39. — Ligne de Nontron à Sarlat. Section d'Hautefort à Terrasson et de Condat à Sarlat. *Rapport sur l'exécution des Travaux :*
a) Passage supérieur de Laveix, p. 61, Pl. 25 ; *b*) Viaduc de Muratel, p. 37, Pl 37.

Art. 4. — Rayons et contrefiches isolées (RC)[40] (f_{27})
(Type Gloucester)

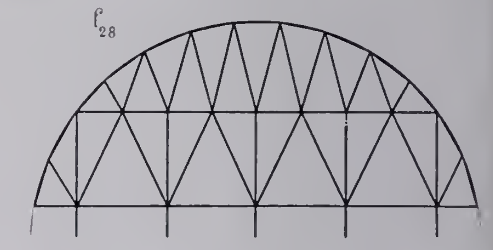


Intrados	Ponts :	Voir: Tome	Voir: page: Tableau synoptique	Voir: page: Monographie	Portée (*Portée entre articulations*)	Montée (*Montée entre articulations*)	Fermes: Épaisseur en 0m01	Fermes: Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle: Cube de bois	Par m. q. de douelle: Poids de fer	Par m. q. de douelle: Dépense	A la clef en m m: Surhaussement	A la clef en m m: Tassement
Arcs très surbaissés, articulés	Höfen	IV	39	41	41m *28*	*2m80*	25c	1m35			56f 40		2mm
	Marbach		39	45	43.50 *32*	*3.10*	25				17.30		72
	Baiersbronn		39	48	40 *33*	*3.30*					16.20		
	Munderkingen		53	56	59 *50*	*15*	24	1.85			22.60	120mm	

Les contrefiches ne s'entr'aident pas. Ce type est fort inférieur au précédent à rayons et triangles.

§ 5. — *CINTRES A TREILLIS. PLUSIEURS ÉTAGES. — ARCS A GRANDE FLÈCHE*

Art. 1. — Treillis en W[41] (f_{28})



Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Épaisseur	Écartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Arcs peu surbaissés	Palmgraben	II	121	165	49	14.44	Étages: supr : 21 infér bois ronds: 21 à 27	1.50			35	130	
	Schalchgraben			170	52	15.033.	Étages: supr : 17 à 22 infér bois ronds: 18 à 27	1.50			80.80	150	110
Arcs assez surbaissés	Krenngraben	III	87	136	40	10	Étages: supr : 20 infér bois ronds: 20 à 25	1.60			49.50	100	
	Salcano		87	144	85	21.80	Étages: supr : 20 à 28 interm: 20 à 25 infér. 21 à 32	1.30	1.51	12.5	359.90	220	40
	Langenbrand		89	153	59	14.75	Étages: supr : 25 infér: 40	1.50	0.74	13.9	48.80	150	52

f29

Art. 2. — Treillis en N (f_{29})

Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Épaisseur	Écartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Arcs assez surbaissés	Montanges	III	17	65	80.29	20.465	25	1.633	1.07	80.5	186.30	160	amt: 85 avt: 160
	Strandeelven		85	132	41	11.25		1.25 1.15			49.10		42

[illegible]ter, I, 1 8, Tein[illegible]h, III, 2 4 ; 41. — Jaremcze, III, 116, Rothweinbach, II, 172

Intrados	Ponts :	Voir :			Portée	Montée	Fermes		Par m. q. de douelle			A la clef en *m m*	
		Tome	pages : Tableau synoptique	pages : Monographie			Epaisseur en 0m01	Ecartement d'axe en axe	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Ellipse	Avenue Edmonson	I	91	124	42m37	13m39	20c3	1m676	0mc64			16mm	8mm
Arcs — assez surbaissés	Chester	III	11	29	60.96	12.80			0.38		16f90		
Arcs — assez surbaissés	Oppedette [43]				32	6.40	22 / 25	1.65	0.43	9k91	27		
Arcs — très surbaissé (articule)	Elise	IV	127	152	47.50 / 43.50 entre rotules	4.40		1.16	0.62			80	40

§ 7. — *COMMENT ON A APPUYÉ LES CINTRES FIXES QUAND ON NE POUVAIT PAS BATTRE DE PIEUX*

On a :

nivelé le rocher et fixé ensuite les poteaux par des goujons [44];

foré des trous dans du rocher [45], dans de la marne dure qui se serait étoilée sous le battage [46], puis descendu dans ces trous les pieux coupés normalement à leur axe, en les y maintenant par du ciment coulé ou injecté ;

appuyé les poteaux sur des semelles en bois [47], sur des plates-formes en maçonnerie [48], en béton [49].

§ 8. — *CUBE DE BOIS* K, *POIDS DE FER* p, *DÉPENSE* d, *PAR* m. q. *DE DOUELLE POUR LES DIVERS TYPES DE CINTRES FIXES*

Art. 1. — Graphique des renseignements recueillis (p. 143). — Il rapproche et compare pour 62 cintres fixes les quantités de bois et de fer, et aussi les prix, — le tout par m. q. de douelle, celle-ci calculée comme l'indique l'Avertissement en tête des Tomes I à IV.

Les portées sont comptées au-dessus du sol [50].

Au graphique, ne figurent pas les cintres qui cubent plus de 1mc par m. q. de douelle [51].

42. — Nydeck (II, 33); Chemnitz (IV, 109) : appuis sur palées.

43. — Basses-Alpes (1904).

44. — Bellows Falls (III, 227).

45. — Gour-Noir (III, 105); Rébuzo (I, 48) : quelques palées.

46. — Lavaur (II, 137); Antoinette (II, 146); Amidonniers (I, 199).

47. — Signac (I, 132).

48. — Plauen (III, 54).

49. — Rébuzo (I, 50); Cornélius (IV, 181).

50. — On a réduit celle des ponts : Antoinette, à 47m50; du Diable, à 54m; de Lavaur, à 60m; de Saint-Waast (étude *), à 63m.
* Projet d'une voûte de 65m, présenté en 1882, non approuvé.

51. — Notamment, parmi ceux de 40m et plus, ceux de : Wäldlitobel, 1mc03 (II, 121); Calcio, 1mc08 (III, 81); Walnut Lane, 1mc20 (II, 63); Plauen, 1mc24 (III, 15); Nogent, 1mc373 (I, 77); Salcano, 1mc51 (III, 87); Steyrling, 1mc72 (III, 87).

Art. 2. — Que conclure du graphique ? — Pour quelques cintres, on a pris les équarrissages un peu au hasard.

Dans le coût des cintres fixes, le fer compte peu.

Pour les cintres à rayons (seuls R, ou à triangles RT), tant que la hauteur entre la clef et le terrain naturel est inférieure à la moitié de la portée, on peut accepter :

$$K = 0{,}06 + \frac{2a}{100}$$

Le cube total, par conséquent le prix, varie donc avec le carré de la portée.

K est aussi fonction de la hauteur h entre la clef et le sol, de la forme de la voûte, et quelque peu encore de sa largeur. Il augmente avec la hauteur et le surbaissement.

Les cintres à rayons sont légers.

Pour des portées voisines, les cintres de Neckarhausen, Göhren, Max-Joseph et Wallstrasse semblent sensiblement plus légers que celui de Lavaur : mais ils sont beaucoup plus bas.

CHAPITRE III

CINTRES COMPLÈTEMENT RETROUSSÉS

C'EST A-DIRE NE S'APPUYANT QU'AUX NAISSANCES OU TOUT PRÈS DES NAISSANCES

§ 1. — *QUAND ET POUR QUELLES VOUTES* [52] *« RETROUSSE-T-ON » LE CINTRE ?*

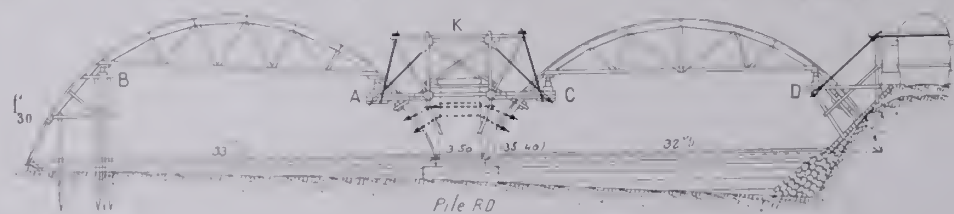
On « retrousse » une ferme quand on ne peut pas l'appuyer sur le sol, c'est-à-dire quand il est trop loin ; — qu'il est mauvais ; — quand on n'y peut pas enfoncer de pieux ; — quand il ne faut pas gêner sous le cintre l'eau, les crues, la navigation ; — pour deux voûtes jumelles, quand on veut transporter tout d'une pièce le cintre de la première voûte sous la deuxième [53].

52. — Au XVIIIe siècle, on employait systématiquement pour les anses de panier surbaissées des cintres retroussés flexibles, formés de plusieurs cours d'arbalétriers assemblés sous des angles très ouverts, reliés par des moises pendantes (Ponts d'Orléans, 1751-1760, plus grande arche : 32^{m}48 ; de Nogent-sur-Seine, 1769, 29^{m}24 ; de Mantes, 1757-65, 38^{m}98 ; de Neuilly, 1768-74, 39^m). On acceptait des tassements énormes : 0^{m}51 à Neuilly.

On voulait que les cintres suivissent, sans jarrets, tous les mouvements de la voûte : on employait des mortiers de chaux grasse qui prenaient très lentement et restaient très longtemps plastiques. On a encore, sur de tels cintres, construit les ponts de Vieille-Brioude (I, 25), de Prarolo et Maretta (III, 96), de Saint-Étienne (II, 56).

Toutefois, dès la fin du XVIIIe siècle, Gauthey recommandait de soutenir autant que possible les cintres sur leur longueur par des appuis portant directement sur le ferme. Il a construit sur cintres fixes le pont de Navilly, sur le Doubs, achevé en 1790.

53. — Au pont de Romans, sur l'Isère (voir tableau, p. 70), les fermes retroussées AB, CD (f_{30}) des



deux voûtes rive droite, étaient posées en A et C sur les abouts d'un cantilever K installé sur la pile rive droite.

CINTRES FIXES. — Cube de bois K, poids de fer p, par mètre carré de douelle

Les Cintres à	sont écrits en	et indiqués par le signe
Rayons *(éventail)*	*Italiques*	○
Poteaux et triangles	**lettres droites**	□
Poteaux et contrefiches	lettres rondes	◇

On a souligné ceux que l'on sait avoir été calculés.
h est la hauteur au-dessus du terrain naturel.
(E) indique les cintres à rayons, étudiés, non exécutés.

Echelles. — Portée 0m005 p. 1m ; K cube de bois, 0m15 p. 1mc ; p poids de fer, 0m0007 p. 1kg ; Epaisseur du 1er rouleau, 0m01 p. 1m.

Les échelles sont prises de telle sorte qu'au point de vue de la dépense, le bois et le fer soient équivalents ; c'est-à-dire que le m. c. de bois étant estimé 75f, le kilog. de fer 0f35, la distance verticale entre les deux points relatifs à un ouvrage donne le prix par m. q. de douelle à l'échelle de 0m002 p. 1f.

k. Cube de bois par m.q. de douelle

Cintres à rayons

$k = 0,06 + \frac{2a}{100}$

Epaisseur uniforme du 1er rouleau

admise dans le calcul des cintres à rayons

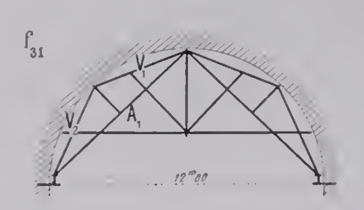
Portée 2a

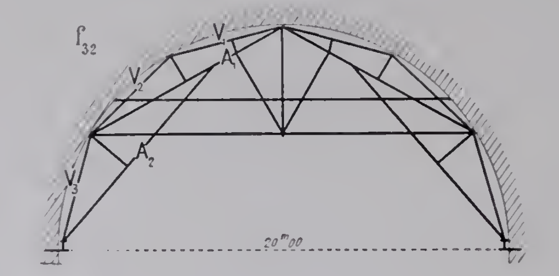
P, Poids de fer par m.q. de douelle

Plein Cintre E (0,201) (h 9,5)
Ellipse ¼ E (0,261) (h 7)
St Waast (0,232) (h 13,00)
Auzon (0,48) h 7,50
Blère (0,662) h 6,50
Montlouis (0,594) h 8,50
Digoin (0,595) (h 9,10)
Chalonnes (0,729) (h 10,00)
Argentat (0,90)
Marmande (0,669) h 15,00
Ouroux (0,435)
St Loup (0,455) h 9,60
Oppedelle
Belleperche (0,416) (h 20)
Bachelard (0,346) h 16,5
Rebuzo
Boucicaut
Signac
Avignon
Seythenex
Longuich (0,82)
Cornelius (0,71) h 5,70
Wittelsbach
Reichenbach
Maximilien (0,72) h 10,70
Mehring
Orléans (0,53)
Amidonniers (0,54)
Amidonniers (0,52) (h 13,80)
Antoinette (0,59) (h 15,00)
Eaux Salées (0,704) (h 28,90)
Claix (0,745) (h 10,00)
Ballochmyl. (E) (0,746) (h 46,00)
Illerbeuren (0,89) (h 13,00)
Guggersbach (0,35) (h 11,00)
Diable (0,58) h 12,00
Annibal (0,54) h 18
Escol (0,52) h 27,20
Lavaur (0,66) (h 26,00)
Gour Noir (0,71) h 16,00
Gohren (0,51) h 7,85
Neckarhausen (0,35) (h 6,60)
Krummenau (0,77) (h 16,50)
St Waast (0,665) (h 21,00)
Max Joseph (0,55) (h 10,40)
Wallstrasse (0,58) (h 13,6)

Art. 1. — Viaducs en plein cintre. Voûtes jusqu'à 30m.

De 4 à 16m, 2 vaux V_1, V_2, un arbalétrier A_1 (f_{31}).





De 16 à 25m, 3 vaux V_1, V_2, V_3, 2 arbalétriers A_1, A_2 (f_{32}).

C'est le type classique des cintres de viaducs, justifié jusqu'à 25m par d'innombrables exemples. Il n'a guère changé depuis les premiers viaducs de Morandière.

Voici, pour quelques cintres à arbalétriers, des quantités et des prix :

Viaducs :	Portée	Fermes		Par m. q. de douelle			Lignes de :	Dates
		Epaisseur en 0m01	Ecartement d'axe en axe	Cube de bois	Poids de fer	Dépense		
du Crêt et de la Culée	5m	12	1m28	0mc 244	3k671	16f64	Morez à Saint-Claude	1909-11
du Puits	6	12	1.28	0. 236	3.083	15.64		
de la Croix	8	20		0. 264	4.27	26.94	Brives à Limoges	1873-75
de Valfin	10	20	1.32	0. 289	3.164	21.81	Morez à Saint-Claude	1909-11
de Châteaulin	12	28		0. 343	3.74	23.86	Nantes à Châteaulin	1863-64
de Parthenay	12	28		0. 325	2.24	13.54	Neuville à Bressuire	1879-81
du Saillard (calculé)	12	20	1.40	0. 240	2.077	17.54	Morez à Saint-Claude	1909-11
de Quimperlé	15			0. 345	3.73		Nantes à Châteaulin	1861-63
de Vezouillac	16		1.60	0. 289			Rodez à Millau	1873-77
de Sénouard	18	25	1.60	0 348	10.55	32.10	Marvejols à Neussargues	1879-82
d'Aguessac	18.46	30	1.55	0. 304			Rodez à Millau	1873-77
du Sarget	20	27		0. 460	7.10		Brives à Limoges	1873-75
du Piou	20	25	1.60	0. 362	13.80		Séverac à Marvejols	1878
de Chante-Perdrix	20	25	1.60	0. 336	13.87	34.62	Marvejols à Neussargues	1879-82
de Barajol	20	25	1.45	0. 463	42.71	52.80	Bort à Neussargues	1903-07
de Morez	20	25	1.47	0. 443	2.33	27.11	Morez à Saint-Claude	1909-11
de Pompadour	25	27		0. 534	5.81		Brives à Limoges	1873-75
de la Crueize	25	21	1.55	0. 434	12.88	42.48	Marvejols à Neussargues	1879-82
de Mussy	25	27	1.47	0. 436			Paray-le-Monial à Givors	1892-97
des Plaines	30	27	1.333	0. 692	51.052		Moûtiers à Bourg-Saint-Maurice	1910-12

A titre de comparaison avec les cintres à arbalétriers de 25m, voici celui du Saillard, à arbalétriers rayonnant des naissances [54], cintre *calculé*.

du Saillard	25	18 / 22	1.55	0. 351	16.194	31 34	Morez à Saint-Claude	1909-11

54. — Imité de celui de Ramounails (II, 179, 187).

Art. 2. — Voûtes de 40^m et plus.

Intrados		Ponts :	Voir : Tome	Voir : pages — Tableau synoptique	Voir : pages — Monographie	Portée	Montée	Fermes — Épaisseur en c^m01	Fermes — Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle — Cube de bois	Par m. q. de douelle — Poids de fer	Par m. q. de douelle — Dépense	A la clef en m/m — Surhaussement	A la clef en m/m — Tassement
Pleins cintres		Collonges	I	11	32	40^m	20^m	30^c	1^m34	0^mc99	19^k7	122^f70		30^mm
		Oloron		30	46	40	20	35	1.17 / 1.84	1.08	9.4	95.40		
		Saint-Sauveur [55]		11	29	42	21	30	1.57	2.23 / 1.23	25.5 / 13.8	313.40 avec l'échafaudage / 155.60 cintre seul		
Arcs	peu surbaissés	Ramounails	II	179	187	40.30	12.90	18 / 22	1.35	0.47	22.7	45.60	30^mm	21
		Gravona			184	43.53	16.80	23	1.10	1.13	3.6	69.30		
	assez surbaissé	Seythenex (voûte rive droite)	III	171	179	41.19	10.05	27	1.25	0.63	11.1	63.50	50	29

Le cintre de Ramounails, avec ses arbalétriers rayonnant des naissances et ses entraits horizontaux, est fort bien compris.

Mais, aux autres grandes voûtes, le type à arbalétriers n'a pas été heureusement appliqué : à Oloron, à la Gravona, il est confus ; à Collonges, les arbalétriers atteignent 21^m20 avec 30^c × 30^c.

§ 3. — *CINTRES A ÉTAGES EN PORTE-A-FAUX*

Comme ils sont fort épais aux naissances, ils exagèrent la portée de la voûte : celle-ci devrait peu dépasser la portée retroussée du cintre, qui est celle qu'imposent les lieux : or, elle est bien plus grande (tableau ci-dessous).

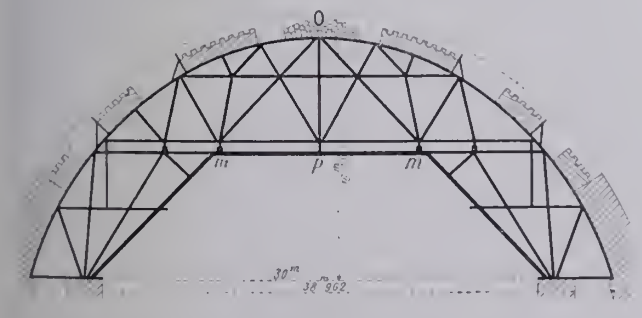
Ces cintres sont un peu confus : il y a beaucoup de pièces, et il n'est pas aisé d'en prévoir le travail [56, 57].

Voici ce qui concerne 4 grands cintres :

Intrados	Ponts :	Voir : Tome	Voir : pages — Tableau synoptique	Voir : pages — Monographie	Portée $2a$	Montée	Portée retroussée du cintre $2a'$	Augmentation de portée de la voûte $2a-2a'$	Fermes — Épaisseur en c^m01	Fermes — Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle — Cube de bois	Par m. q. de douelle — Poids de fer	Par m. q. de douelle — Dépense	A la clef en m/m — Surhaussement	A la clef en m/m — Tassement
Plein cintre	Solis	I	53	57	42^m	21^m	27^m	15^m	22^c à 30^c	1^m15	0^mc85	8^k5	66^f10	100^mm	51^mm
Ellipse surhaussée	Wiesen	I	233	241	55	33.34	39	16	22 à 28	1.33	2.65	51.9	119.50	100	100
Arcs peu surbaissés	Cinuskel	II	179	190	46.98	20.241	36	10.98	18 à 20	1.20	0.53	14.8	52.20	0	62
	Tuoi		181	195	47.71	21.42			18 à 20	1.00 / 0.95	0.61	7.6	61.10	100	33

55. — Il a fallu soutenir le cintre par un échafaudage partant du fond de la vallée.

f_{33} — Pont sur le Val-Mela
Cintre — État des travaux au moment de la chute



56. — Chute du cintre du pont sur le Val-Mela (Ligne de Bevers à Schuls, Engadine) (f_{33}), 29 août 1911.

Il était calculé pour le 1er rouleau.

Il y avait des bois ronds mal assemblés. L'été de 1911 a été très chaud : les bois avaient travaillé.

A l'amont, le bandeau débordait la ferme de 30 à 35^mm.

Le 29 août 1911, — jour de la chute, — les points O et p avaient tassé par rapport aux points m de :

	Amont	Aval
O	20^mm	5^mm5
p	55^mm	28^mm

Schweizerische Bauzeitung, 23 novembre 1912, p. 281 à 285 : « *Zum Gerüsteinsturz des Val-Mela-Viadukts auf der Linie Bevers Schuls der Rh. B.* »

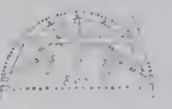
57. — Même type de cintre : au plein cintre de Muttnertobel (cintre retroussé sur 16^m50) (Albula-Bahn, Denkschrift im Auftrage der Rhätischen Bahn, — Prof. Dr Hennings, Pl. 13, Coire, chez F. Schuler, 1908) ; — à l'arche de Triquent sur le Trièges (Portée, 35^m40 ; montée, 9^m70), (Ligne électrique à voie de 1^m du Chatelard à Martigny ; — au plein cintre de 25^m de Stulsertobel (Ligne de Bevers à Schuls, Engadine).

§ 4. — *CINTRES RETROUSSÉS A RAYONS (ÉVENTAIL)*

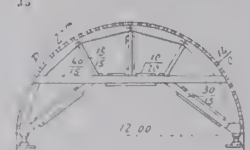
Art. 1. — Entrait non armé. — Pleins cintres de 8m à 12m. — L'éventail repose sur un chevalement fait d'un entrait et de deux arbalétriers (f_{34}, f_{35}, f_{36}).

L'entrait est fléchi dans f_{34}, f_{35}, non dans f_{36}.

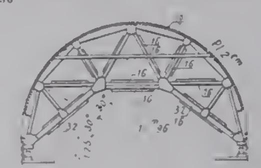
f_{34} – Viaduc du Caty [58]



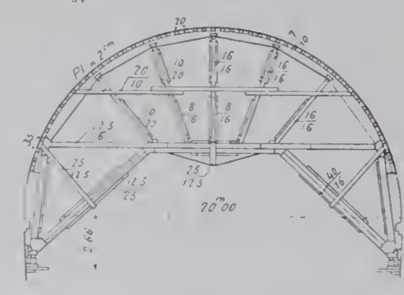
f_{35} – Viaduc de Nice [58, 59]



f_{36} – Viaduc de la Bassera [60]



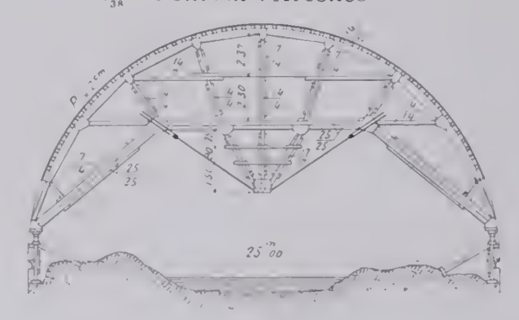
f_{37} – Pont de Saint-Waast [58]



Art. 2. — Entrait armé par un tirant (*Type Saint-Waast*). Pleins cintres de 20 à 25m. — Pour 20 à 25m, on a armé l'entrait par un tirant en fer rond fileté aux deux bouts (f_{37}) [61, 62].

Art. 3. — Entrait armé par un câble d'acier. Cintres de l'Arconce. 25m (f_{38}). du Sornin. 35m (f_{39}). — Pour armer l'entrait, un câble d'acier vaut mieux qu'un tirant. Il résiste mieux à la tension et se règle comme on veut.

f_{38} - Pont sur l'Arconce [63, 64]



f_{39} - Pont du Sornin [65]

Quand la portée augmente, on brise les arbalétriers [66] qui portent l'entrait,

58. — Ligne de Montauban à Castres (1882-1884).

59. — Le type de Nice a été appliqué à des viaducs de la ligne de Nontron à Sarlat (1885-87) : Saint-Jean-de-Cole (14m), Saint-Germain (15m).

60. — Ligne de Nice à Coni (1913).

61. — Le type de Saint-Waast a été appliqué à trois ponts en plein cintre de la ligne d'Elne à Arles-sur-Tech : sur la rivière Ample (13m); sur la Palmère (21m); sur le Tech, à Amélie-les-Bains (26m).

62. — On a, de même, raidi par un tirant l'entrait des cintres partiellement retroussés de deux ponts sur l'Aude, de 30m (Ligne de Quillan à Rivesaltes, 1899) : ponts d'Aliès et d'Axat.

63. — Ligne de Paray-le-Monial à La Clayette (1896-1900).

64. — Même cintre au pont de Courlans, sur la Vallière (25m) (Ligne de Saint-Jean-de-Losne à Lons-le-Saunier, 1900-1902).

65. — Ligne de La Clayette à Lamure (1896-1900).

66. — Au pont du Castelet (II, p. 132), retroussé sur 26m40, l'écartement était maintenu par des cornières attachées à un encoffrement de tôle qui coiffait l'about des arbalétriers : on ne pouvait pas régler la tension.

suivant un polygone dont chaque sommet est tenu par un câble : on n'y accepte pas d'angle de plus de 160°.

On a fait ainsi : d'abord le cintre de 35^m du Sornin (f_{39}, Φ_3), puis ceux de Luxembourg [67] et de Constantine [68].

Φ_3 - Cintre du Pont du Sornin



Voici ce qu'ont coûté les cintres de l'Arconce et du Sornin :

	Pont sur l'Arconce		Pont du Sornin	
I. Main-d'œuvre :				
Fondations		113f 70		86f 35
Bois — Épure, taille, montage	1.604f 20	2.201 30	4.709f 20	6.313 65
Bois — Démontage et enlèvement	490 50		1.246 60	
Bois — Outils et faux-frais (environ 1/20)	106 60		357 85	
Ensemble		2.315 »		6.400 »
II. Fournitures (les matériaux restant à l'Entrepreneur) :				
Bois sur chantier (déchets non compris)	1.904 16	3.813 56	7.236 60	11.752 90
Métaux — Tôles pour assemblages	488 76		1.413 60	
Métaux — Fers pour boulons, brides, broches, clameaux, chevilles	441 78		786 20	
Métaux — Acier pour câbles, tendeurs, étriers, plaques d'ancrage, et fonte pour culots	910 20		2.171 75	
Métaux — Plomb pour articulations, zinc aux abouts des pièces	68 66		144 75	
III. Divers :				
Câbles de contreventement, pieux d'amarrage, boites à sable		46 »		1.047 10
Total		6.174 56		19.200 »

67. — II, p. 72bis. 68. — II, p. 110.

Art. 4. — Cintres retroussés à rayons (Éventail) : Dimensions, quantités, prix.

	Viaducs en plein cintre				Ponts					
					en plein cintre			en arc peu surbaissé		
	Caty	Nice	Bassera	St-Waast	Courlans	Arconce	Sornin	Castelet	Constantine	Luxembourg
Voir Tome, page	V, 146	V, 146	V, 146	V, 146		V, 146	V, 146	II, 117, 132	II, 65, 110	II, 61, 72bis
Portée	8m	12m	12m	20m	25m	25m	35m	41m20	68m76	84m65
Montée	4m	6m	6m	10m	12m50	12m50	17m50	14m	25m	31m
Fermes — Nombre	4	4	4	4	6	6	6	5	4 sous chaque anneau	5
Fermes — Epaisseur — de rive — chevalement		0m12		0m14		0m25	0m25	0m25	0m38	0m25
Fermes — Epaisseur — de rive — cerveau	0m10		0m16			0.14	0.18	0.20	0.23	0.19
Fermes — Epaisseur — intermédiaire — chevalement	0.15	0.15		0.16		0.25	0.30	0.25	0.38	0.38
Fermes — Epaisseur — intermédiaire — cerveau	0.10					0.17	0.23	0.25	0.23	0.23
Fermes — Ecartement d'axe en axe — de rive		1.37		1.50		1.50	1.60	1.65	1.50	1.60
Fermes — Ecartement d'axe en axe — intermédiaire							1.50	1.50		
Cube de bois (poteaux compris) — d'une ferme — de rive	0m396	2m323	2m3647	5m373	7m310	7m3082	21m3625	29m3379	45m3716	42m3374
Cube de bois — d'une ferme — intermédiaire		2.59		6.41	8.20	7.864	25.91	34.391		55.775
Cube de bois — de toutes les fermes C_1	3.84	9.64	10.588	24.28	47	45.62	146.89	161.931	365.724	252.073
Cube de bois — des pièces communes (platelage, contreventements, couchis) C_2	3.49	6.37	5.999	12.09	31.77	22.33	47.27	45.308	111.477	134.466
Cube de bois — total du cintre $C = C_1 + C_2$	7.33	16.01	16.587	36.37	78 77	67.95	194.16	207.239	508.907	386.539
Cube de bois — par m.q. de douelle $K = \frac{C}{S}$	**0.14**	**0.204**	**0.223**	**0.281**	**0.248**	**0.257**	**0.511** [70]	**0.556**	**0.597**	**0.634**
Cube de bois — rapport $\frac{C_2}{C}$	0.48	0.40	0.36	0.33	0.40	0.33	0.24	0.22	0.22	0.34
Poids de fer — total P	179k	276k	1.400k	1.965k	7.879k	9.443k [69]	15.520k	14.759k	83.719k	57.900k
Poids de fer — par m. q. de douelle $p = \frac{P}{S}$	**3.5**	**3.51**	**18.8**	**15.19**	**24 77**	**35.63**	**40.81**	**39 60**	**99**	**95**
Poids de fer — par m.c. de bois $\frac{P}{C}$	24.42	17.24	84.4	54.83	100	139	79.94	71.21	163.80	149 79
Dépense réelle (tout compris) — totale D			2.943f 38	3.293f »	5.820f 75	6.174f 56	19.200f	30.000f	250.132f 84	101.138f 75
Dépense réelle — par m.q. de douelle $\frac{D}{S}$			39.72	25.46	18.30	23.29	50.48	80.50	296 »	165.80
Dépense réelle — par m.c. de bois $\frac{D}{C}$			177.45	90.64	73.90	90.87	98.89	144.76	489.50	261.65
Dépense par m.c. de bois, fers non compris			109.93		44.56	62.77	75.63	102.82	376.83	140.11

(Constantine, cube de bois à dépense : pour les deux anneaux. — Luxembourg : Pr un seul anneau. On a fait les 2 voûtes sur le même cintre.)

§ 5. — *CUBE DE BOIS* K, *POIDS DE FER* p, *DÉPENSE* d, *PAR* m. q. *DE DOUELLE POUR LES DIVERS TYPES DE CINTRES RETROUSSÉS*

Art. 1. — Graphique des renseignements recueillis (p. 149). — Le graphique, p. 149, rapproche et compare pour 43 cintres retroussés les quantités de bois et de fer, et aussi le prix, — le tout par m. q. de douelle, celle-ci calculée comme l'indique l'Avertissement en tête des Tomes I à IV.

Au graphique, ne figurent pas les cintres qui cubent plus de 0mc80 par m. q. de douelle [71].

Art. 2. — Que conclure du graphique ? — Pour quelques cintres, on a pris les équarrissages au hasard.

Les cintres à rayons (seuls R, ou à triangles RT) sont légers; toutefois, sauf pour les très grandes portées, d'autres cintres quand ils sont *calculés,* peuvent l'être aussi.

Pour les cintres retroussés à rayons, on peut accepter, pour une première indication, les formules empiriques :

$$K = 0{,}04 + 0{,}012\ (2a) \qquad p = 1{,}2\ (2a) - 8$$

Sauf pour des hauteurs excessives, le cintre fixe est toujours plus économique. Mais si, pour le cintre retroussé, le prix de revient se peut assez approximativement évaluer d'après les quantités de bois et de fer, pour le cintre fixe, il y faut faire entrer les dépenses de fondation, de battage de pieux, etc...

69. — A l'Arconce, on a réemployé les câbles du Sornin, trop forts pour une voûte de 25m.

70. — Au Sornin, premier cintre à câbles, on a été timide.

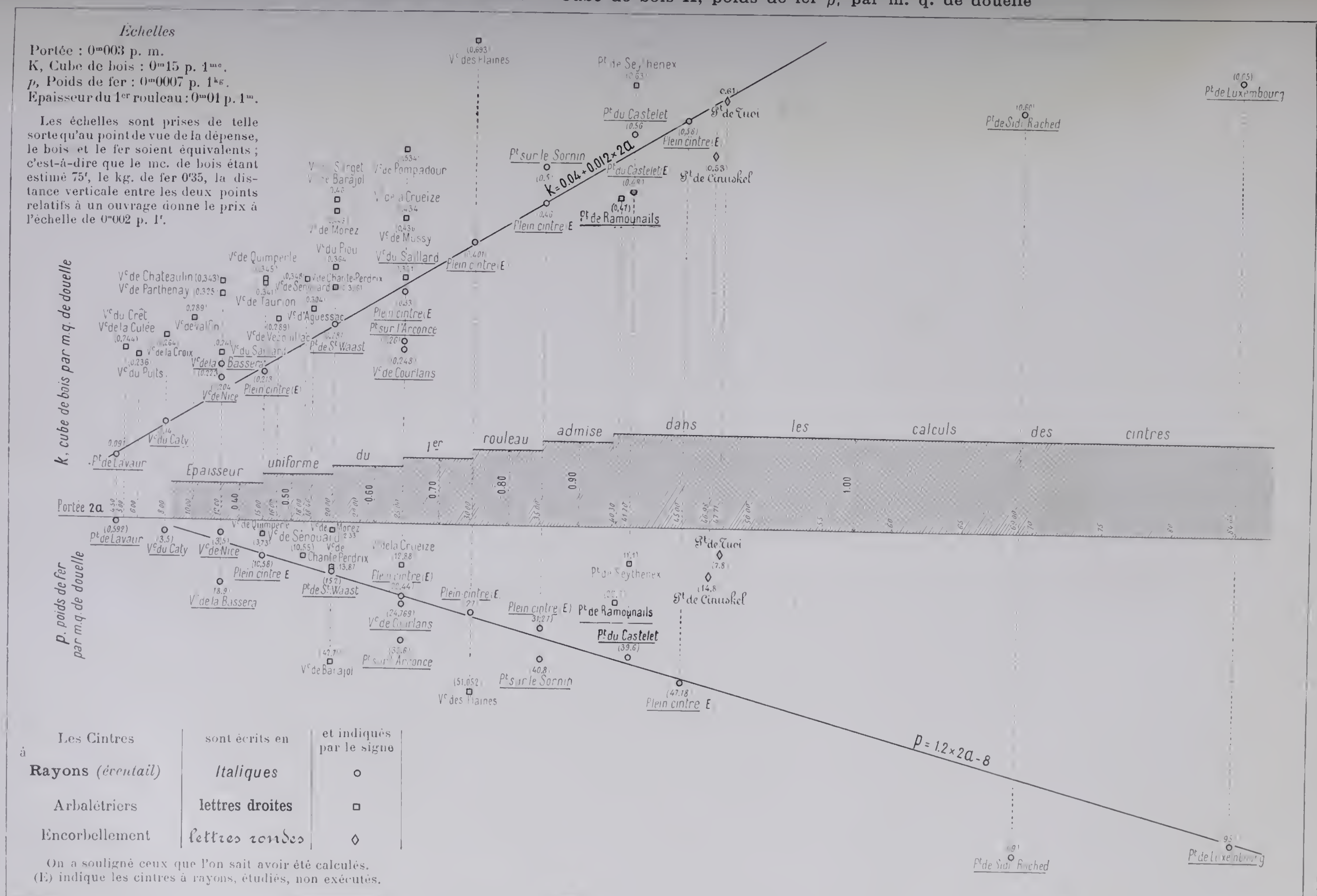
71. — Notamment, parmi ceux de 40m et plus, ceux de : Solis, 0mc85 (I, 53); Collonges, 0mc99 (I, 11); Oloron, 1mc08 (I, 39); Gravona, 1mc13 (II, 179); Saint-Sauveur, 1mc23 (I, 11); Wiesen, 2mc65 (I, 233).

CINTRES RETROUSSÉS. — Cube de bois K, poids de fer p, par m. q. de douelle

Échelles

Portée : 0m003 p. m.
K, Cube de bois : 0m15 p. 1mc.
p, Poids de fer : 0m0007 p. 1kg.
Épaisseur du 1er rouleau : 0m01 p. 1m.

Les échelles sont prises de telle sorte qu'au point de vue de la dépense, le bois et le fer soient équivalents ; c'est-à-dire que le mc. de bois étant estimé 75f, le kg. de fer 0f35, la distance verticale entre les deux points relatifs à un ouvrage donne le prix à l'échelle de 0m002 p. 1f.



Les Cintres à	sont écrits en	et indiqués par le signe
Rayons (*éventail*)	*Italiques*	○
Arbalétriers	lettres droites	□
Encorbellement	lettres rondes	◇

On a souligné ceux que l'on sait avoir été calculés.
(E) indique les cintres à rayons, étudiés, non exécutés.

SUPÉRIORITÉ DES CINTRES A RAYONS (ÉVENTAIL)
ET COMME CINTRES FIXES ET COMME CINTRES RETROUSSÉS

Dans ces cintres, les assemblages sont simples : au Sornin (f_{39}, Φ_3), à Luxembourg[71 bis], pas de tenons, de mortaises, d'embrèvements : par exemple, les vaux portent, sans coupe, sur les contrefiches ; tout tient par les couvre-joints boulonnés.

L'exécution en est facile et précise.

Ils n'ont pas de lignes surabondantes ; les calculs en sont très simples par la Statique graphique.

Ils doivent donc être les plus économiques : ils le sont.

Ils tassent peu.

Quand on construit une voûte, il faut connaître les points du cintre au droit desquels elle tendra à s'ouvrir. Dans un cintre susceptible de déformations d'ensemble, on ne le peut pas : avec le type en éventail, ce sont sûrement les abouts des contrefiches ; c'est là que, par un joint sec, un taquet, un coffrage, on ménagera une articulation dans le rouleau en construction.

J'ai employé ce type : en cintres fixes, pour pleins cintres, pour arcs peu surbaissés, assez surbaissés, très surbaissés, pour ellipses ; en cintres retroussés, pour toutes portées.

Les Ingénieurs qui l'ont appliqué s'en sont félicités.

Il est fort à conseiller.

CHAPITRE V

CINTRES MARINIERS
RETROUSSÉS SUR LA LARGEUR DE LA PASSE NAVIGABLE

Au-dessus d'une passe navigable, on a jeté :

des arbalétriers peu inclinés concourants[72], ou soutenant une pièce horizontale[73] ;

Φ_4. — Pont de Marmande : Cintres mariniers



des fermes à grands arbalétriers très inclinés qui reçoivent la charge de flanc[74] (Φ_4) ;

des poutres de bois : à grandes mailles[75] ; à treillis serré[76] ;

des poutres : bois, et tirants en fer[77] ;

des poutres métalliques[78].

71bis. — II. p. 71ter. 72. — Mehring (III, 231, 252), passe de 11m20.

73. — Lasserat (III, 89, 156), passe de 10m ; Orléans (III, 233, 259), passe de 9m ; Boucicaut (III, 231, 247), passe de 10m60 ; Neckargartach (IV, 169, 189), passe de 9m.

Au pont Boucicaut, on a agrandi la passe pendant la construction d'une voûte (III, 247).

74. — Marmande, 1881-1886 : arches de 36m, passe de 18m.

75. — Londres (I, 139, 147), passe de 13m50.

76. — Alma (I, 139, 155), passe de 11m80 ; Mantes (I, 141, 161), passe de 16m ; Pont-sur-Yonne (I, 211, 214), passe de 15m.

Viaduc du Point-du-Jour, 1863-66. (Dessins distribués aux Élèves de l'École des Ponts et Chaussées, série 3, section A, p. 20, Pl. 8) : à 2 arches, passe de 12m.

77. — Ponts de : Lays, sur le Doubs (26m) ; Arcial, sur la Saône (31m) ; Schweich (III, 235, 268), passe de 16m ; Cassel (III, 286, 303), passe de 6m.

78. — Longuich (III, 237, 279), passe de 19m.

CINTRES EN MÉTAL

Art. 1. — Pourquoi a-t-on fait des cintres en métal ? — Pour laisser passer les crues, la navigation [80, 81, 82], des trains [83].

Ils sont indiqués quand on a à construire un grand nombre de voûtes semblables [84], ou quand on doit faire un pont large en accolant des anneaux minces [79, 85].

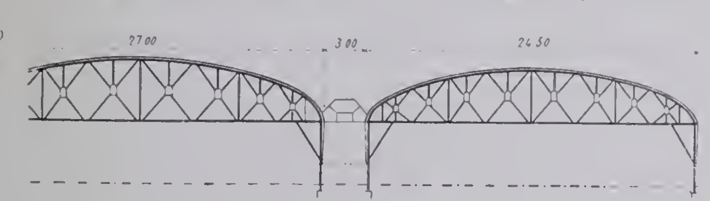
Art. 2. — Types de cintres en métal. — On a fait en métal un étage inférieur seul [86], — la couronne des vaux seule, et alors à poutre pleine [87], — tout le cintre [88].

On en a appuyé [89] entre naissances.

On en a retroussé sur toute la portée [88].

Parmi ceux-ci, les uns sont posés à leurs abouts, d'autres articulés [90]. Il y en a d'articulés à la clef et aux retombées [91].

79. — Nouveau pont de Bâle sur le Rhin (1904-1905), 6 voûtes en maçonnerie : 2 de 24m50, 2 de 27m, 2 de 28m. Elles ont 18m8 de largeur : on les a faites chacune en trois anneaux de 6m26 sur un seul cintre à 4 fermes métalliques (f40).

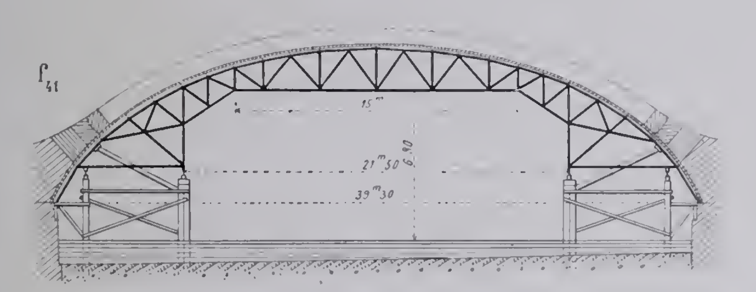


Chaque cintre a servi 3 fois pour une voûte, 6 fois pour les deux voûtes de même portée.

Tassement pendant la construction : 14mm à 22mm.

Die Haupt-, Neben-, und Hilfsgerüste im Bruckenbau, — von Dr techn. Robert Schönhöfer, K. K. Ober-Ingenieur und Privatdozent, — W. Ernst und Sohn, Berlin, 1911, p. 95.

80. — Nouveau pont Auguste à Dresde. Voûtes en béton ; ouvertures : 32m95 à 39m3 ; largeur : 18m. Aux 5 plus grandes, on ménagea une passe marinière haute de 6m80 au-dessus de l'étiage, large de : 21m50 en bas, 15m en haut.



Les cintres (f41) avaient 10 fermes espacées de 1m74. Ils ont tassé de 50mm à la clef, pendant le bétonnage.

Loc. cit. renvoi 79.

81. — Tolkmitt a construit (1890-1891) une arche, de 18m de portée, 3m40 de montée, 10m de largeur, du pont de Copenick à Berlin, sur une poutre en treillis, ménageant une passe de 7m70. Les fermes étaient appuyées aux naissances et sur deux palées. On les amenait de l'usine en trois morceaux.

Une ferme pesait 1.340k ; le cintre, 8.550k, — soit 47k4 par m. q. de surface couverte.

Zeitschrift für Bauwesen, 1892, p. 355 et suivantes.

82. — Pont de Valence (I, 143, 177).

83. — Passages supérieurs en béton pour remplacer des passages à niveau. — A la fin de 1900, on avait construit 110 ponts avec 6 cintres : l'un d'eux avait servi 24 fois.

Nouvelles Annales de la Construction, juin 1901, p. 88 : « *Cintres métalliques mobiles employés en Bavière* », par René Philippe, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

84. — Souterrains. — Au Mont-d'Or (Ligne de Frasne à Vallorbe, 1911-1914), les mêmes cintres ont servi 55 à 60 fois.

85. — Rocky River (II, 63, 101). 86. — Kempten (IV, 113, 117) ; Spokane (III, 285, 296).

87. — Putney (III, 231, 241) ; Édouard VII (I, 145, 184).

88. — Valence (I, 143, 179) ; arche centrale rive gauche.

89. — Valence (I, 143, 178) ; arches de rive, arche centrale rive droite.

90. — Svenkerud (III, 87, 151). 91. — Rocky River (II, 63, 101) ; Delaware (III, 285, 291).

Art. 3. — Poids et prix par m. q. de douelle.

		Ponts :	Voir : Tome	Voir : pages Tableau synoptique	Voir : pages Monographie	Portée	Montée	Écartement des fermes	Par m. q. de douelle Cube de bois	Par m. q. de douelle Poids de fer	Par m. q. de douelle Dépense	A la clef en *m m* Surhaussement	A la clef en *m m* Tassement
Cintres tout en métal	appuyés (2 palées entre les naissances)	Valence Voûte : rive droite	I	143	178	49m20	10m85	1m66	0mc44	183k5	119f 10	60mm	50mm
		rive gauche (2e emploi)				*id.*	*id.*		*0 30*	*180.9*	*31.70*	*50*	*41*
		centrale rive droite				id.	12 30	1.66	0.28	209.6	118.10	100	91
	entièrement retroussés	centrale rive gauche	I	143	179	id.	id.	1.33	0.28	377.1	189.50	85	97
		Rocky River	II	63	101	85.34	24.64	7.06 2 fermes		584	201.80		44.5
Étage inférieur seul en métal (2 appuis entre les naissances)		Kempten	IV	113	117	Pont aval 63.80 Pont amont 64.50 50.60 entre rotules	Pont aval 25.76 Pont amont 27.58 8.85 entre rotules	1.55	0.42		114.20	Bois Étage supér' 50 Fer Étage infér' 23.4	

Les cintres métalliques sont fort chers de premier emploi.

CHAPITRE VII

SURHAUSSEMENT

Art. 1. — Cintres fixes. — On a souvent surhaussé les cintres fixes[92]. Or, ils tassent peu ; on ne sait pas à l'avance de combien, et il n'importe guère que la clef soit basse de quelques centimètres.

Les surhausser complique assez inutilement les épures.

Art. 2. — Cintres retroussés. — Les grands cintres retroussés tassent beaucoup[93] ; on ne peut prévoir de combien. On les surhausse, un peu d'après ce qui a été observé à des cintres comparables, beaucoup au sentiment.

Pour les cintres à câbles, c'est facile en serrant leurs écrous[94].

CHAPITRE VIII

ACCIDENTS

Un cintre s'est écroulé :

parce que les palées portaient sur des semelles de bois ayant servi et percées de trous[95] ;

parce qu'il était mal assemblé ou mal conçu ;

parce que de longs poteaux, mal contreventés, ont flambé ;

parce qu'une crue a emporté des palées.....

92. — Voir les Tableaux synoptiques, p. 136 à 141. 93. — Voir les Tableaux synoptiques, p. 145.

94. — Voir Tome II, p. 73, renvoi 19. 95. — Voûte de 38m50 du pont Cornélius (IV, 182).

PRÉCAUTIONS DIVERSES

Art. 1. — Cintres ayant déjà servi. — Parfois les cintres employés à nouveau tassent beaucoup : il y est tout particulièrement nécessaire de mettre des feuilles de tôle dans les assemblages [98, 99, 100].

Art. 2. — Arrosage. — On a quelquefois arrosé les cintres pendant la construction des voûtes pour faire gonfler les bois ; puis on les a laissés sécher après clavage pour favoriser le décintrement [101].

Art. 3. — Incendie. — Pour prévenir ou arrêter un incendie, on organise une surveillance spéciale de jour et de nuit ; on dispose un réservoir d'eau tout près [102].

CHAPITRE X

APPAREILS DE DÉCINTREMENT

§ 1. — *BOITES A SABLE* [103]

Excellent appareil de décintrement, très simple. Pour les grandes voûtes, c'est, en France, à peu près le seul employé [104].

On a logé des boîtes à sable dans des caisses remplies de plâtre qui foisonne par l'humidité et remplit bien les vides [105].

Quelquefois, le cintre porte d'abord sur des billots qu'on remplace par des boîtes à sable au moment du décintrement [106]. Ce n'est pas à conseiller : une voûte en ciment, qui tasse très peu, est décintrée au changement.

98. — Au pont de Losde (Ligne de Tarascon à Ax, 1882-1883), arc, portée 30m60, montée 6m30, on a employé le cintre du pont voisin de Remoulines. Il a tassé : sur cintre, de 58mm ; au décintrement (60 jours après clavage, — MOV, chaux du Teil), de 1mm4.

99. — A une arche de 25m (la 2e à partir de la culée rive droite) du viaduc de la Sitter, le cintre tassa de 180mm, tassement énorme « *imputable pour la plus grande partie à ce fait que les cintres avaient déjà été employés à d'autres viaducs et que leurs assemblages avaient du jeu* ». (Observations pendant la construction et aux épreuves, par M. l'Ingénieur Acatos.)

Schweizerische Bauzeitung, 29 octobre 1910, p. 242. « *Der Sitterviadukt der Bodensee Toggenburgbahn* ».

100. — Au pont des Amidonniers, les cintres en 2e emploi n'ont pas plus tassé qu'au premier.

	Voûtes de 42m		Voûtes de 38m50	
	amont	aval	amont	aval
Premier emploi (Rive droite)	28mm	23mm	19mm	21mm
Deuxième emploi (Rive gauche)	24mm	25mm	18mm	17mm

101. — Teinach (IV, 204) ; Gravona (II, 184) ; Munderkingen (IV, 59) ; Walnut Lane (II, 90).

102. — Walnut Lane (II, 89).
Le 7 avril 1905, le feu a pris au cintre de Salcano (III, p. 149, S_6).

103. — On se servait d'abord de simples sacs remplis de sable, dont on réglait la sortie en serrant l'ajutage par une corde. Ce mode d'opérer a été imaginé, en 1847, par Beaudemoulin, au pont de Port-de-Piles ; mais il était employé par les Egyptiens pour mettre en place les obélisques. (Choisy, *Histoire de l'Architecture*, I, p. 38.)

104. — Toutes les voûtes françaises de 40m et plus ont été décintrées sur boites à sable, sauf :
a — sur coins : Fium'Alto (I, 89, 110) ; Berdoulet (II, 117, 128) ; Gravona (II, 179, 184) ;
b — sur vérins : Saint-Sauveur (I. 11, 29) ; Boucicaut (III, 231, 246) ;
c — avec roulettes descendant sur une surface de vis : Nogent-sur-Marne (I, 77, 81).

105. — Lavaur (II, 119, 137) ; Antoinette (II, 119, 144 bis).

106. — Claix (III, 13, 37) ; Grasdorf (IV, 125, 130).

§ 2. — *COINS*[107]

Les coins suffisent pour de petits cintres, jusqu'à 12^{m} par exemple. Mais, pour les grands, les bois s'impriment l'un dans l'autre, l'humidité les gonfle, et il est à peu près impossible de les faire glisser.

On les a cependant employés à des voûtes de 40^{m} et plus, récemment encore à l'étranger[108], — très rarement en France[104-a].

On les a munis de boulons à vis, et encore n'a-t-on pas toujours réussi à les « décoller »[109].

On desserre plus facilement trois coins : un mobile entre deux fixes[110].

On a employé des coins d'acier manœuvrés par des vis[111].

On a placé quelquefois les coins sous les couchis[112], sous les vaux[113].

§ 3. — *VÉRINS*[114]

Pour les voûtes de 40^{m} et plus, on les a employés : en France, très peu[115] ; en Allemagne, à quelques ponts inarticulés[116], à la plupart des ponts articulés[117, 118].

§ 4. — *DÉCINTREMENT PAR ÉCRASEMENT DE PIÈCES DU CINTRE*

On a entaillé les poteaux sous les vaux[119] ; — ruiné des billots placés au niveau du sol pour dégager des coins sous l'étage supérieur[120] ; — diminué progressivement, à coups de scie verticaux, des billots à base évidée (système Zuffer)[121, 122].

§ 5. — *DÉCINTREMENT EN DÉTENDANT DES CABLES*

Dans les cintres retroussés à câbles d'acier, on commence le décintrement du

107. — Boites à sable et coins : Edouard VII (I, 145, 184) ; Wiesen (I, 233, 241) ; Guggersbach (III, 15, 60) ; Coulouvrenière (IV, 79, 82).

108. — Ballochmyle (I, 39, 42) ; Big Muddy River (I, 223, 228) ; Walnut Lane (II, 63, 88) ; Victoria (II, 199, 204) ; Jaremcze (III, 83, 116) ; Canale (III, 183, 187) ; Mosca (III, 193, 200) ; Putney (III, 231, 241) ; Mehring (III, 231, 252) ; Schweich (III, 235, 268) ; Longuich (III, 237, 279) ; Spokane (III, 285, 296), (coins en fonte sous les couchis) ; Boberullersdorf (III, 287, 299) ; Elsen (III, 287, 300) ; Cassel (III, 287, 303) ; Munderkingen (IV, 53, 56) ; Gohren (IV, 125, 140).

109. — Luxembourg (II, 61, 72 bis). 110. — Gloucester (I, 87, 108) ; Morbegno (IV, 63, 71).

111. — « Screw wedges » (Pont sur la Rocky River, II, 63, 101).

112. — Gignac (I, 87, 105) ; Chester (III, 11, 29) ; Crespano (II, 11, 47) ; Nydeck (II, 13, 53) ; Bellows-Falls (III, 223, 226).

113. — Connecticut (I, 61, 71).

114. — Vérins et coins : à Reichenbach (IV, 169, 183) ; à Sidi Rached (II, 65, 110) ; vérins, coins et boîtes à sable : à Signac (I, 129, 132).

115. — Dès 1848, aux ponts de Cé,
Pour les voûtes de 40^{m} et plus, voir renvoi 104-*b*.
Au pont Boucicaut, ils ont servi à dégager les coins.

116. — Langenbrand (III, 89, 153).

117. — Tome IV : Garching (93, 98) ; Chemnitz (105, 109) ; Kempten (113, 117) ; Elise (127, 152) ; Illerbeuren (157, 160) ; Malling (167) ; Hochberg (167, 177) ; Cornelius (167, 181) ; Wittelsbach (171, 199) ; Moulins-lez-Metz (171) ; Mannheim (173), Neckarhausen (221, 233) ; Max-Joseph (223, 244) ; Prince Régent (223) ; Sigmaringen (251, 255).

118. — Au pont de Neckarhausen (IV, 221, 236), les vérins s'étaient enfoncés de 3^{cm} dans les semelles pendant le bétonnage. On les a encadrés de billots, qu'on a sciés au moment de décintrer.

119. — Annibal (I, 89, 113) ; Diable (I, 89, 117). 120. — Plauen (III, 15, 55).

121. — Décrit dans la monographie du pont de Krenngraben (III, 136).

122. — Système appliqué aux ponts autrichiens de : Krenngraben (III, 87, 136) ; Steyrling (III, 87, 139) ; Salcano (III, 87, 144) ; Palmgraben (III, 121, 165) ; Schalchgraben (II, 121, 170) ; Rothweinbach (II, 123, 172) ; puis en Suisse, aux ponts de : Lichtensteig (III, 89, 162) ; Krummenau (III, 91, 165) ; Cinuskel (II, 179, 190) ; Tuoi (II, 181, 195).

cerveau en détendant les câbles[123].

On fait ensuite descendre les reins sur coins, mieux sur boîtes à sable.

§ 6. — *DIVERS*

Au pont de Nogent[124], on a fait descendre des roulettes sur une surface de vis.

Au pont de la Delaware[125], les voûtes sont bâties sur fermes d'acier à trois articulations : en manœuvrant des tiges filetées, on a diminué la longueur des deux panneaux de clef.

CHAPITRE XI

CALCUL

§ 1. — *PRESSION NORMALE* p *PAR UNITÉ SUR LE CINTRE A UNE DISTANCE ANGULAIRE* α *DE LA CLEF*

J'ai proposé en 1886 la formule :

$$p = \gamma c \left(1 + \frac{c}{2R}\right) \sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha} \quad ^{126}$$



γ est la densité de la maçonnerie ;
c l'épaisseur en M (f_{42}) à attribuer au 1er rouleau ;
R le rayon de courbure en M.

Pour les grands cintres, on néglige c devant 2 R, et on applique la formule simplifiée :

$$p = \gamma c \sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha} \quad ^{127,\,128}$$

Par elle, les cintres se calculent très facilement et très vite[129] ; j'ajouterai, très exactement : au pont de Luxembourg, les efforts des câbles mesurés par leurs flèches étaient ceux que donnait le calcul.

123. — Luxembourg (II, 61, 80).
Ponts du Sornin, de l'Arconce (voir leurs cintres, p. 146, 147).

124. — I, 77, 81. 125. — III, 285, 291.

126. — J'ai indiqué comment elle a été établie : Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, « *Construction des Ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette* », p. 508 à 527.

C'est une bonne formule pratique. Elle suppose que les voussoirs s'appuient sur le cintre dès 22° ½ sur l'horizontale, — ne glissent sur le cintre qu'à 45°. Ces deux hypothèses sont plus défavorables que la réalité.

En effet, soient : φ l'angle de glissement d'un voussoir sur mortier,
φ' — des voussoirs sur le cintre,
j'ai trouvé :

	Maximum	Minimum	Moyenne
pour φ, sur 712 expériences	90°	25°	37°
pour φ', sur 266 expériences	44°	25°	36° 30'

(Loc. cit. p. 506, 507.)

127. — On a ainsi calculé nombre de cintres : Castelet (II, p. 132) ; Lavaur (II, p. 137) ; Antoinette (II, p. 144 bis) ; Luxembourg (II, p. 72 bis) ; Amidonniers (I, p. 199) ; Gour-Noir (III, p. 104) ; Montanges (III, p. 65) ; Sornin, Arconce (p. 146),....

128. — On trouvera à l'APPENDICE, des tables de : $\log \sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha}$; $\sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha}$.

129. — Voir à l'APPENDICE, le calcul du cintre de Luxembourg.

§ 2. — *TRAVAIL PERMIS*

Art. 1. — Bois (Pin, Sapin). — *A. - Pièces fléchies (vaux, couchis).* — Le 1/5 de la charge de rupture, pratiquement 80^k $\overline{0^m01}^2$.

B. - Pièces comprimées. — *B_1. - Dans le sens des fibres.* — Soit φ « l'élancement » d'une pièce, c'est-à-dire le rapport :

$$\frac{\text{L (longueur libre)}}{b \text{ (plus petit côté ou diamètre)}}$$

On peut admettre pour le travail par $\overline{0^m01}^2$ les formules suivantes :

Pièces rectangulaires (coefficient de sécurité de 1/5) :

$$\beta_m = \frac{80}{1 + \left(\frac{\varphi}{24}\right)^2} \quad {}^{130,\,131}$$

Bois ronds, pieux (coefficient de sécurité de 1/7) :

$$\beta_m = \frac{60}{1 + \frac{1}{3}\left(\frac{\varphi}{12}\right)^2} \quad {}^{130,\,131}$$

B_2. - Normalement aux fibres[132]. — Le 1/4 de la charge d'écrasement, 10^k à 12^k [133].

Art. 2. — Câbles d'acier. — L'acier des fils résiste couramment à 100^k, 120^k $\overline{0^m001}^2$.

J'ai admis 20 à 25^k par $\overline{0^m001}^2$ de surface utile.

CHAPITRE IX

POUR UN PONT A *n* ARCHES, COMBIEN DE CINTRES ?

Art. 1. — Pour 2, 3 arches. — On emploiera 2, 3 cintres.

Art. 2. — Pour 4 arches. — On a fait quelquefois 3 cintres, presque toujours 4.

Art. 3. — Pour 5 arches. — On a fait rarement 3 cintres[134] (Φ_2), souvent 4 [135].

130. — Voir pour ces formules : *Loc. cit. renvoi 126*, p. 529 à 534.

131. — On trouvera à l'APPENDICE une table numérique de β_m.

132. — Voir p. 132, art. 2. 133. — Voir p. 132, renvoi 6.

134. — Ponts : des Amidonniers (I, p. 193) ; de Belleperche, 5 ellipses de 33^m à 1/3,75.

135. — Ponts : de Lays sur le Doubs, 5 arcs très surbaissés de 26^m ; d'Ouroux sur la Saône, 5 ellipses de 33^m à 38^m, surbaissées à 1/4,5.

Φ_3 — Pont des Amidonniers



Pour un pont à voûtes très tendues, le mieux est d'employer 5 cintres et de tout décintrer le même jour[136]. Autrement, les piles tendent à se déverser du côté de la moindre poussée ; une arche, décintrée avant que les autres ne la contrebuttent, tasse trop.

Art. 4. — Pour plus de 5 arches. — On s'est contenté quelquefois de 3 cintres neufs[137].

Pour les pleins cintres, on en a, le plus souvent, employé 4, 5[138].

Pour les arcs surbaissés et les ellipses, le nombre en a fort varié[139]. Pour les arcs surbaissés, il est bon d'en faire 5.

Si on est pressé, on augmente le nombre des cintres[140].

Quand on emploie moins de cintres que de voûtes, on conduit les voûtes de façon à ne pas trop pousser les piles[138].

136. — Boucicaut (III, p. 243).

137. — Viaduc des Calvets, 6 ellipses de 27^m à 1/3,85 ; pont de Puicheric, sur l'Aude, 6 arcs de 20^m à 1/6.

138. — Appendice. — Viaducs.

139. — Ponts : d'Arcial, 7 arcs de 31^m à 1/7,47, 4 cintres ; de Digoin, 9 arcs de 26^m à 1/7,4, 6 cintres ; d'Avignon, 10 arcs de 40^m à 1/8, 5 cintres (III, p. 270) ; de Saint-Loup, 7 arcs de 33^m à 1/7,5, 5 cintres ; de Bléré, 6 ellipses de 24^m à 1/3,65, 5 cintres ; de Cé, 11 ellipses de 25^m à 1/3,27, 4 cintres ; de Lanne, sur l'Adour, 7 ellipses de 24^m à 1/3,16, 4 cintres ; de Port-Sainte-Marie, 8 ellipses de 32^m à 1/3,2, 6 cintres.

140. — Pont de Chalonnes, 17 ellipses de 30^m au 1/4, 9 cintres.

TITRE III

COMMENT ON EXÉCUTE LES GRANDES VOÛTES EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE[1]

CHAPITRE I

ROULEAUX

§ 1. — *POURQUOI ON CONSTRUIT PAR ROULEAUX*

Le prix des cintres augmente avec le carré de l'ouverture et l'épaisseur de la charge : il importe donc de les charger aussi peu que possible, surtout les grands.

On construit à pleine épaisseur jusqu'au joint à partir duquel la voûte commence à s'appuyer sur le cintre : ce sera vers 60° de la clef pour les pleins cintres, les ellipses, les arcs peu surbaissés ; aux naissances pour les arcs assez et très surbaissés.

Au-dessus, on n'exécute pas du premier coup la voûte sur toute son épaisseur ; mais on l'étale par deux, par trois couches successives.

§ 2. — *COMMENT, DEPUIS 1800, ON A CONSTRUIT LES VOUTES DE 10ᵐ ET PLUS*

De 1800 à 1850, toujours à pleine épaisseur ; voici ce qu'on a fait ensuite :

Epaisseur à la clef e_0	de 1850 à 1880			après 1880			
	à pleine épaisseur	en 2 rouleaux	en 3 rouleaux	à pleine épaisseur	en 2 rouleaux	en 3 rouleaux	en 4 rouleaux
1ᵐ15 et au-dessous				Michelau, Ziegenhals, Huzenbach, Gross-Kunzendorf, Schwusen, Teinach, Chemnitz, Avignon, Boucicaut, Neuhammer, Elyria	Seythenex $e_0 = 0^m 90$		
1.20				Edouard VII, Wengern, Bellows-Falls, Krappitz	Saint-Pierre Verdun Ramounails	Amidonniers	
1.25				Orleans	Castelet	Amidonniers	
1.30	Alma				Brent Oloron Rebuzo Saulnier		
1.35				Putney, Wheeling			
1.40	Calcio			Worochta, Diveria	Ceret Gravona Canale	Solis Rothweinbach Boïlefos	
1.45	Saint-Sauveur				Empereur-François	Luxembourg Lusserat	
1.50		Claix		Plauen	Verdon Escot Freyssinet	Antoinette, Ponch Krenngraben Strandeelven Montanges Constantine	
1.60	Mantes					Valence, Svenkerud	
1.65						Lavaur	
1.70		Signac Berdoulet		Wäldlitobel	Jamna	Gour-Noir Palmgraben Schalchgraben	
1.75		Fium'alto					
1.80	Prarolo	Bains-de-Lucques	Nogent-sur-Marne		Schwandeholzdobel Langenbrand	Wiesen	Krummenau
1.90	Collonges						
2.00		Cabin-John	Annibal Diable		Gutach	Steyrling	
2.10						Jaremeze, Salcano	

1\. — Pour les voûtes en béton, voir p. 27.

Le nombre de rouleaux dépend de l'épaisseur de la voûte. En général, on a construit : en deux rouleaux, jusqu'à 1m40 d'épaisseur à la clef ; en trois rouleaux, au-delà.

§ 3. — *ÉPAISSEUR DU 1er ROULEAU*

Art. 1. — Que porte le 1er rouleau ? — On constate que le 2e rouleau tasse peu[2], souvent ne tasse pas[3], que le 3e ne tasse pas.

Le premier fait office de cintre pour le 2e [3].

Le cintre et le premier rouleau ne sont pas également compressibles : ils ne portent pas ensemble le 2e. De plus, après le clavage du 1er rouleau, la température peut s'élever assez pour qu'il quitte le cintre et travaille seul.

Il doit être assez fort pour se porter et porter le 2e rouleau, sans flamber ou s'écraser[4].

Art. 2. — Rapport, dans les voûtes exécutées, de l'épaisseur du 1er rouleau e'_0, e'_1, à l'épaisseur totale e_0, e_1[5].

		2 rouleaux	3 rouleaux
à la clef : $\frac{e'_0}{e_0}$	minimum	0.326	0.33
	maximum	0.72	0.58
	en général	0.50	0.33 à 0.43
aux retombées : $\frac{e'_1}{e_1}$	minimum	0.25	0.28
	maximum	0.67	0.44
	en général	0.50	0.30 à 0.40

Il y a intérêt à avoir des rouleaux minces :

1° pour moins charger le cintre ;

2° pour bien remplir jusqu'à l'intrados, soit les fissures sur cintre s'il s'en produit, soit les joints secs ménagés pour les prévenir.

On a donné, de l'épaisseur du 1er rouleau, un calcul théorique[6,7] : dans mes voûtes, je l'ai prise au sentiment[7 bis].

Aux Amidonniers (I, 203), le 1er rouleau n'avait, au cerveau, qu'un moellon : nous avons fait ainsi à quantités de voûtes.

2. — Au pont du Diable (I, 116), pouzzolane et chaux grasse additionnée de chaux du Teil, le cintre tassa sous le 2e rouleau

3. — Pas de tassement après le clavage du 1er rouleau aux ponts du Castelet (II, 134), de Lavaur (II, 142), Antoinette (II, 148),....

4. — Si les rouleaux sont indépendants, on pourrait faire le 1er en matériaux plus résistants. A Cabin-John (III, 72), le 1er rouleau est en granit, le 2e en grès

5. — Pour les épaisseurs des rouleaux, voir : Castelet (II, 132) ; Lavaur (II, 138) ; Antoinette (II, 146) ; Amidonniers (I, 203).

6. — Aux ponts de Wiesen (I, 242) et de Cinuskel (II, 191), le 1er rouleau a été calculé comme un arc élastique pour porter le 2e sans faire travailler le cintre.

7. — « *Lorsqu'on construit une voûte par rouleaux, au lieu de l'exécuter en une seule opération, on* » *réduit les distances à l'intrados des différents points de la courbe des pressions dans un rapport sensi-* » *blement égal à 1/2, quel que soit le nombre de rouleaux.* » (M. Résal : « *Traité des Ponts en maçonnerie* », Tome I, p. 211, Paris, 1887).

Ce calcul suppose que « *l'on décintrerait le premier rouleau avant de procéder à l'exécution du* » *second* ». (Loc. cit. p. 211, renvoi.)

Si on ne le fait pas, — et il est peu probable qu'on s'y risque, — « *le rapport des distances à l'intrados* » *des points correspondants des deux courbes des pressions relatives l'une à la voûte construite par rouleaux,* » *l'autre à la voûte construite en une seule fois, est égal : pour deux rouleaux à 3/4, pour trois rouleaux* » *à 2/3* ». (Loc. cit. p. 212, renvoi.)

« *Ce procédé* (la construction par rouleaux) *procure nécessairement une réduction de travail maximum* » *à la compression ou à l'extension à la clef.....*

» *....., par contre,..... dans la région du joint de rupture, les valeurs du travail maximum sont* » *augmentées.*

» *..... on peut corriger ce défaut,..... en réglant convenablement les épaisseurs relatives des rouleaux* » *successifs, qui doivent varier de la clef aux naissances et non pas rester constantes, comme nous l'avons* » *jusqu'ici supposé dans cette étude toute théorique.* » (M. Résal : « *Emplacements, débouchés, fondations. — Ponts en maçonnerie* », p. 217, Paris, 1896.)

« *L'épaisseur à la clef doit être partagée à peu près également entre les rouleaux successifs. Au joint de rupture, elle doit être attribuée en presque totalité au premier rouleau.* » (Loc. cit. p. 223.)

Dans ces indications toutes théoriques, on ne tient compte ni des mouvements des cintres, ni des matages des joints laissés vides dans chaque rouleau, lesquels créent ou modifient les pressions.

7 bis. — Voir I, 242, renvoi 6.

§ 4. — *ROULEAUX SOLIDAIRES OU ROULEAUX INDÉPENDANTS ?*

Art. 1. — Rouleaux solidaires. — Presque toujours, les queues des assises de chaque rouleau forment dents d'engrenage avec les découpes nécessaires pour y encastrer les voussoirs du suivant [8].

La découpe est d'une assise à l'autre et non d'un moellon à l'autre dans la même assise.

Art. 2. — Rouleaux superposés indépendants. — Dans les voûtes romaines [9], puis du Moyen-âge [10], dans quelques voûtes modernes [11], les rouleaux sont superposés sans lien entre eux. C'est ainsi qu'on construit souvent les voûtes en briques [12, 13].

§ 5. — *ADOPTION SYSTÉMATIQUE DE LA CONSTRUCTION PAR ROULEAUX*

On a reproché à la construction par rouleaux de répartir très inégalement les charges, le premier rouleau portant presque tout.

Aussi quelques Ingénieurs l'ont-ils déconseillée [14, 15].

Mais, dans les voûtes construites sans joints secs, c'est-à-dire avec fissures, les efforts se répartissent plus mal qu'entre les rouleaux successifs d'une voûte

ϕ_1 — Cloaca-Maxima [16]



8. — Les rouleaux n'étaient reliés que de distance en distance : au pont du Diable (I, 118), par quelques briques engagées ; au pont Annibal (I, 114), par des voussoirs de tuf.

Ce n'est pas à imiter.

9. — Dans « *L'Art de bâtir chez les Romains* », Choisy donne des dessins de voûtes romaines en 2 rouleaux superposés (Basilique de Constantin, Thermes de Caracalla,...), en 3 (Panthéon).

L'Aqueduc Alexandrina est en 2 rouleaux, la Cloaca-Maxima (500 ans avant J.-C.), en 3 (ϕ_1).

10. — Bandeaux en 2 rouleaux superposés aux vieux ponts de Céret (I. 118), de Tournon (II, 36).

11. — Pont de Cabin-John (III, 75).

12. — 3 rouleaux : pont sur la Gimone (Ligne de Toulouse à Auch) ; pont de St-Waast (V. 105, renvoi 32), 20m ; 2 rouleaux : pont des Bains de Lucques (III, 33).

Les Italiens construisent ainsi leurs voûtes : viaducs tout récents de la ligne Coni-Vintimille (1911-14).

13. — Pour les petites voûtes, on moule les briques, avant de les cuire, en forme de voussoirs pour regagner la différence de développement entre l'intrados et l'extrados.

14. — « *La maçonnerie sera exécutée.... sur toute l'épaisseur. Il est de règle, en effet, malgré des* « *exemples contraires, de ne point maçonner une voûte.... par zones parallèles à son épaisseur....* »

Dejardin : « *Routine de l'établissement des voûtes* », Paris, 1845, p. 247.

Lire dans le même sens : Morandière : « *Construction des Ponts* », p. 187 ; et, en sens contraire, Dupuit : « *Traité de l'équilibre des voûtes et de la construction des ponts en maçonnerie* », Paris, 1870, p. 283.

15. — La construction par rouleaux « *rend fort incertaine la position de la courbe de pression....* » *Aussi y a-t-on renoncé en Allemagne pour les grandes voûtes surbaissées* ».

Centralblatt der Bauverwaltung, 1906, septembre, 5, p. 455 à 458 ; — 8, p. 462 à 465 ; 19, p. 483 à 486 : « *Fortschritte im Bau weitgesprengter flacher massiver Brücken* », von Landesbaurat Leibbrand in Sigmaringen.

16. — Date de la photographie : août 1908.

Il est possible qu'en théorie les efforts soient mal répartis, que les 2e et 3e rouleaux travaillent peu et ne fassent qu'empêcher le premier rouleau de flamber.

Mais, en fait, on n'a jamais vu le premier rouleau s'écraser.

Pour fuir un danger qu'on n'a pas constaté, on ne peut pas renoncer aux avantages, très réels, de la construction par rouleaux : cintre léger, — chaque rouleau fermé vite, — fissures faciles à bien remplir.

Cette méthode a rendu pratique et économique l'exécution des très grandes voûtes.

C'est par rouleaux qu'on a construit la plupart des grandes voûtes inarticulées[17].

L'expérience, « cette maîtresse impérieuse », a tranché.

CHAPITRE II

TRONÇONS ET CLAVAGES

ON COUPE LES ROULEAUX EN TRANCHES PAR DES JOINTS VIDES PERMETTANT A LA VOÛTE DE SUIVRE, SANS CASSURES, LES MOUVEMENTS DU CINTRE ; PUIS, ON MATE CES JOINTS

§ 1. — *NÉCESSITÉ DES JOINTS VIDES*

Le cintre est élastique : la maçonnerie ne le suit qu'en s'ouvrant.

Il y a fissure là où, à un appui moins flexible, succède un appui plus flexible[18].

Un cintre, même très fixe, très raide, très fortement chargé, plie sous le poids de la voûte plus que la culée ou la pile[19] : de là, une première fissure inévitable[20] au point où les voussoirs commencent à s'appuyer sur lui[21] ; d'autres pourront s'observer au droit de parties plus spécialement fixes du

17. — Je ne sache pas qu'on ait construit, par rouleaux, de voûte à 3 articulations.

18. — De même qu'un aqueduc fondé sur deux terrains de compressibilité inégale se fend à la séparation, — de même que, dans une pile élargie, la nouvelle maçonnerie se sépare facilement de l'ancienne,...

19. — Au cerveau, les voûtes de souterrain se séparent du rocher.

20. — Les agents locaux s'entêtent souvent à les nier : il n'y a pourtant qu'à regarder.
Nombre de constructeurs n'ont pas craint de les avouer.
Voir les monographies des ponts de Fium'Alto (I, 110) ; Annibal (I, 112) ; des Bains de Lucques (III, 34) ; de Calcio (III, 102).
Viaduc de Puycheric, sur l'Aude (Ligne de Moux à Caunes), 1883-1886, 6 arcs de 20m à 1/6 : aux trois premières arches, construites sans précautions spéciales, fissures légères aux naissances.
Pont de Lourdes, sur le Gave de Pau, 1879, arc de 28m au 1/8 : large fente aux naissances du 1er rouleau.
Je puis citer, comme fissurées pendant la construction, plusieurs centaines de voûtes.

21. — Voici, par exemple, les fissures à l'extrados observées à des viaducs en plein cintre :

Viaduc de :		Nombre d'arches fissurées	Portée	α Fissures	β Avancement du 1er rouleau au moment de la fissure
Grangeneuve	Paray-le-Monial	4	15m	58°	32°
Villon	Paray-le-Monial	7	15	60°	15°
Montveneur	Paray-le-Monial	6	15	60°	18°
La Boucle	Lamure	2	20	62°-64°	13°-26°
Mussy	Lamure	1	25	60°	15°
l'Evalude (*Morez-Saint-Claude*), octobre 1908		1	25	44° 48°	34° 41°

cintre : palées[22], abouts de vaux longs, extrémités d'une ferme retroussée d'un cintre marinier[23, 24], etc.... La fixité, la raideur, le chargement du cintre, le mode d'exécution de la voûte peuvent seulement réduire le nombre et l'amplitude des fissures, mais non les supprimer[25, 26, 27].

Acceptons-les, puisque nous ne pouvons pas les empêcher ; mais localisons-les et soyons sûrs de les bien remplir.

Ménageons donc, là où elles peuvent se produire, — c'est-à-dire aux reins de la voûte et à tous les points fixes du cintre, — des joints vides qu'on bourrera, la voûte achevée.

§ 2. — *EMPLACEMENT DES JOINTS VIDES*

Art. 1. — Joints vides aux retombées seulement (c'est-à-dire clavages en trois points : clef et retombées). — Tout d'abord, on n'a ménagé de joints vides qu'aux retombées seulement, — là où la voûte commence à s'appuyer sur le cintre.

On a fait ainsi : en 1788, au pont de Maligny (arc peu surbaissé de 26^{m})[28] ; puis à des arcs très tendus : en 1853, aux 1er et 2e rouleaux du Petit-Pont, à Paris (arc de cercle de 31^{m} à 1/10)[29] ; en 1862, au pont de Tilsitt, sur la Saône, à Lyon (arcs de cercle de $21^{m}40$ à $22^{m}84$ à 1/8, 1/10)[30] ; en 1863-1864, à l'arche d'expérience de Souppes (arc de cercle de $37^{m}886$ à 1/18)[31] ; en 1882, au pont de Teinach[32].

Art. 2. — Joints vides aux retombées et en d'autres points. — En 1847, au pont au Double (arc de cercle de 31^{m} à 1/10), le premier rouleau, exécuté en ciment prompt, fut divisé en 4 grands voussoirs par des intervalles de 1^{m}, maintenus pendant leur construction par des encaissements et clavés les quatre ensemble[29].

22. — Fentes au droit des palées au pont Annibal (I, 114), dans le 1er rouleau des ponts de Saint-Pé (arc de 31^{m} au 1/5) et de Lourdes (arc de 28^{m} au 1/8), sur le Gave de Pau, construits en 1879.

Aux cinq voûtes du Point-du-Jour ($30^{m}25$), exécutées à mortier de ciment en un seul rouleau, légères fissures au droit des points d'appui de chaque ferme du cintre.

Annales des Ponts et Chaussées, 1870, 1er semestre, p. 87.

23. — Deux arches du pont de Marmande, sur la Garonne (1883-1885), ellipses de 36^{m} à 1/3,6, ont été établies sur cintre marinier pour une passe de 18^{m}. Quoiqu'on eût chargé le cerveau du cintre, malgré les quatre coffrages des reins, pendant la construction du 1er rouleau, on observa de minces fissures à un grand nombre de voussoirs du bandeau.

24. — Pont d'Orléans (III, 262). A la voûte extrême rive droite, fissure entre la clef et l'appui du cintre marinier.

25. — Pont du Gour-Noir (III, 106). Les voussoirs des bandeaux au droit des joints secs étaient posés sur mortier. On constata une fissure au droit de l'emplacement de chaque clavage.

26. — Pont de Wiesen (I, 242). On a laissé ouvert, dans la partie construite à pleine épaisseur, le 1/3 extérieur du joint à 64° jusqu'après l'achèvement de la voûte. Au décintrement, on observa là une ouverture de 1^{mm}.

27. — Pont de Walnut Lane (II, 90). Bien que la voûte eût été attaquée en plusieurs endroits à la fois, on n'avait pas ménagé de vide aux retombées : elles s'ouvrirent.

28. — Gauthey : *Construction des Ponts*, p. 88.

29. — Claudel et Larroque : *Pratique de l'art de construire*, p. 489.

30. — M. Kleitz posa à sec sur liteaux de sapin les deux premiers rangs de voussoirs au-dessus des naissances et, après achèvement des voûtes, y coula du ciment. (Morandière : *Construction des Ponts*, p. 191.)

31. — III, p. 375, art. 2. 32. — III, p. 204.

En 1873-74, même méthode au pont de Claix[33]; en 1883-84, au pont de Wäldlitobel[34], quatre attaques simultanées, aux reins et à 24° de la clef; en 1882-83, au pont du Castelet, six tronçons au 1er rouleau[35] : un s'est ouvert au-dessus d'une contrefiche du cintre.

Aussi, à Lavaur[36] (1883-84), avons-nous articulé le premier rouleau au droit de *tous* les points fixes du cintre, c'est-à-dire aux abouts de tous les vaux.

Le mode de construction de Lavaur, décrit Tome II, p. 138 à 142, a été appliqué, exactement, ou légèrement modifié, à nombre de grandes voûtes françaises[37], suisses[38], italiennes[39].

Art. 3. — Tous les joints vides. — Sur un cintre flexible[40], on ne sait pas où s'ouvrira la voûte ; au lieu de la diviser en un petit nombre de tronçons, on pose tout sur cales, puis on coule, on fiche ou on mate le mortier[41].

Aux grandes voûtes sous rails d'Autriche[42], du grand-duché de Bade[43], on a suivi la méthode « française »[44, 45], mais en posant d'abord à sec les voussoirs dans chaque tronçon, puis en y bourrant les joints de mortier à l'état de terre humide, enfin, clavant au mortier sec les intervalles entre les tronçons.

§ 3. — *COMMENT, PENDANT LA CONSTRUCTION DE LA VOUTE, ON MAINTIENT LES JOINTS VIDES*

Art. 1. — Comment on soutient les assises posées à sec. — Les assises à sec sont tenues :

à l'intrados par des bandes de plomb[46, 47] qui restent dans la voûte (plomb mou ordinaire, ou durci par 2 % d'antimoine), ou des tuyaux de plomb[48], lesquels sous les coups de matoir se moulent sur la pierre et ne font pas vibrer le cintre ;

33. — III, 38. 34. — II, 121, 158. 35. — II, 132. 36. — II, 119.

37. — Antoinette, 1883-84 (II, 119, 146) ; Céret, 1883-85 (II, 121, 162) ; Gour-Noir, 1888-89 (III, 81, 106) ; Pouch, 1890 (III, 83, 110) ; Freyssinet, 1890-91 (III, 83) ; Saint-Pierre, 1886 (I, 91, 121) ; Verdun-sur-le-Doubs, 1895-97 (I, 141) ; Verdon, 1905-06 (I, 129, 133) ; Luxembourg, 1899-1903 (II, 61, 76) ; Amidonniers, 1904-07 (I, 189, 203) ; Ramounails, 1906-08 (II, 179, 188) ; Escot, 1907-09 (II, 123) ; Montanges, 1908-09 (III, 17, 67) ; Lusserat, 1908-10 (III, 89, 157) ; Seythenex, 1908-10 (III, 171) ; Sidi-Bached, 1908-12 (II, 65, 112).

38. — Solis, 1901-02 (I, 53) ; Wiesen, 1907-09 (I, 242). 39. — Morbegno, 1902-03 (IV, 63, 72).

40. — Par exemple, les cintres à cours superposés d'arbalètriers de Perronet, certains cintres mariniers,.....

41. — Ponts : Mosca, à Turin, 1834 (III, 193, 201) ; Notre-Dame, à Paris, 1853 ; de Berdoulet, 1860-61 (II, 117, 128) ; Empereur-François, à Prague, 1898-1901 (I, 141) ; Prince-Règent, à Munich, 1900-01 (IV, 233).

42. — Jaremcze, 1893-94 (III, 83, 116) ; Jamna, 1893-94 (III, 83, 118) ; Worochta, 1893-94 (III, 82, 120) ; Krenngraben, 1904-05 (III, 87) ; Steyrling, 1904-05 (III, 87) ; Salcano, 1904-06 (III, 87, 145) ; Schalchgraben, 1904-05 (II, 121) ; Rothweinbach, 1904-06 (II, 123).

43. — Gutach, 1899-1900 (III, 85, 124) ; Schwändeholzdobel, 1899-1900 (III, 85, 128) ; Langenbrand, 1907-09 (III, 89).

44. — « *im Einklange mit französischen Bauausführungen....* » (Pont de Jaremcze, III, 110).

45. — « *im Einklange mit den œsterreichischen oder vielmehr den französischen Bauausführungen die hierfür vorbildlich waren.* » (Pont sur la Gutach, III, 124).

46. — Chester (III, 31) ; Mosca, à Turin (III, 201) ; Nydeck, à Berne (II, 54).

47. — Lavaur (II, 139) ; Antoinette (II, 146) ; Luxembourg (II, 80) ; Castelet (II, 133).

48. — Nous avons fait ainsi, récemment, à des voûtes de la ligne de Morez à Saint-Claude.

par des liteaux de bois dur[49], larges de 3 à 4cm, plus minces de 3mm ou 4mm que le joint, et qu'on enlève ensuite ;

à l'extrados, par des cales de chêne à la demande, mieux par des coins et des barrettes de fer[50].

On a proposé de remplir les joints en coulant du plomb ou du zinc[51] ; mais ces métaux n'ont aucune adhérence avec la pierre, et le plomb résiste moins à la compression que le ciment.

Dans les joints, on a mis du sable, du mortier[52], du mortier maigre[53], du sable entre des bandes de mortier maigre[54].

On ferme l'extrados par de vieux chiffons, des déchets de coton, des sacs,....

49. — Si on emploie des liteaux trop minces ou en bois tendre, ils cèdent ; les voussoirs se touchent et s'écrasent. Le fait s'est produit récemment à un pont à 3 arches en arc de 20m au 1/5 : les 4 sommiers des bandeaux des 3 arches ont éclaté.

50. — Pont de Ramounails (II, 188).

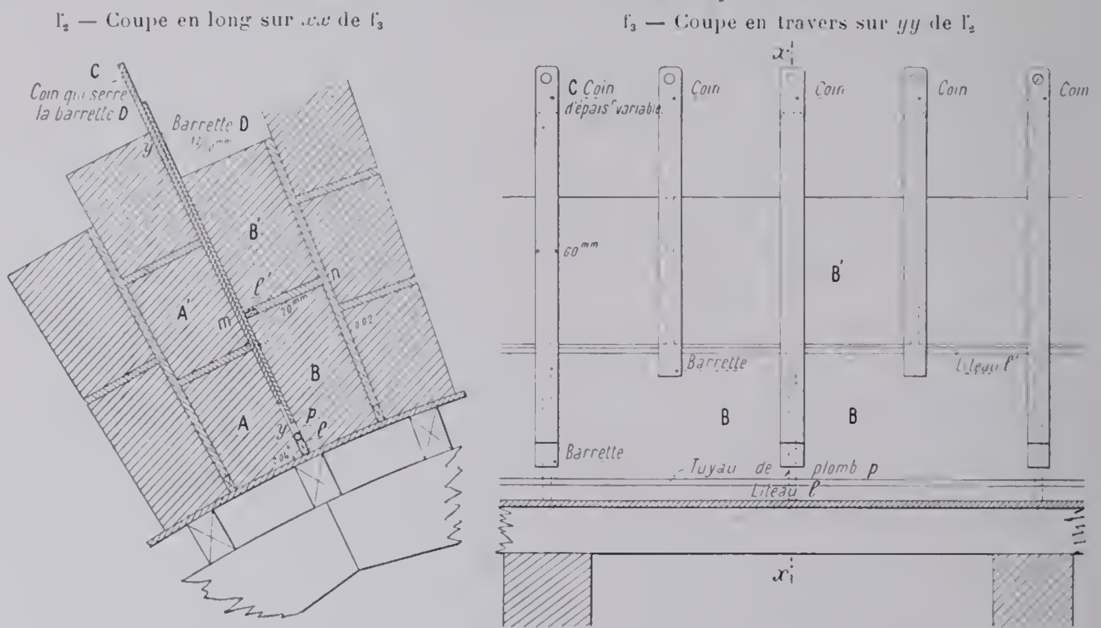
On avait, auparavant, employé le même système aux reins d'une ogive de 30m (pont de Fontpédrouse, V, p. 90). Bien que le joint y fut très incliné (60° sur la verticale) et le rouleau épais, on retira très facilement les coins et barrettes après matage.

Nous employons maintenant, très couramment, cette méthode.

Voici ce qui a été fait à l'arche de 25m du Saillard, aux arches de 20m du viaduc de Morez (Ligne de Morez à Saint-Claude) :

Viaduc de Morez — Comment étaient tenus les joints vides - 5cm

Γ_2 — Coupe en long sur xx de Γ_3 Γ_3 — Coupe en travers sur yy de Γ_2



l liteau s'appuyant sur les moellons bien équarris A (l'assise AA' est maçonnée) ;
p tuyau de plomb (tuyau à gaz) appuyé sur le liteau l ;
D barrette sur laquelle s'appuieront les moellons bien équarris BB' * ;
l' liteau sous le moellon B' : il retient le mortier du joint $m\ n$; il tombe quand on enlève les barrettes.
Les barrettes D retiennent le mortier des joints verticaux et permettent de les ficher.

* A Ramounails (II, 188), on a suiffé coins et barrettes pour pouvoir les retirer facilement ; mais là le mortier adhère mal à la pierre ; un matage bien fait décale sûrement les barrettes.

51. — Voir V, p. 22, renvoi 129.

52. — « *Les coins en bois dur ont l'inconvénient que, souvent, on ne peut plus les enlever.....; aux ponts.... des Chemins de fer rhétiques, on a employé, à la place,.... des bandes de mortier.... avec plein succès.* »
(Schweizer Ingenieur-Kalender 1912, p. 268.)

53. — M. Rabut, Ingénieur des Ponts et Chaussées : Viaducs de 18m et 27m de la ligne de Vire à Saint-Lô (1884).

54. — M. Sabouret, Ingénieur des Ponts et Chaussées : Passage supérieur, en arc de 28m34, dans la station de Bussière-Galand (Ligne de Limoges à Périgueux, 1885).

Art. 2. — Coffrages, taquets entre les tronçons. — Au-dessus des assises sèches, aux reins des voûtes, dans les parties très inclinées sur la verticale, on tient les tronçons supérieurs par des coffrages, des taquets : on les a décrits dans la monographie du pont de Lavaur[55].

§ 4. — *COMMENT ON REMPLIT LES JOINTS VIDES ORDRE DES CLAVAGES*

Art. 1. — Les mater au mortier de ciment sec. — Au moment où vont commencer les clavages, la voûte est décomposée en tronçons formant un polygone articulé au droit de chaque point fixe du cintre. Il s'agit de raidir ces articulations.

On ne peut se contenter du simple coulis, trop souvent employé pour dissimuler les fissures.

Il faut, dans les joints vides, enfoncer un coin[56] qui crée entre les voussoirs des réactions normales aux lits.

On y parvient en matant les joints secs *au refus absolu* avec du mortier de ciment à l'état de sable humide.

Ce mortier acquiert de suite une dureté extraordinaire.

Art. 2. — Employer pour les matages le ciment et non la chaux[57]. — Avec de la chaux à 300ᵏ (1/5 en poids), on obtient des pressions contre les joints presque aussi fortes qu'avec du ciment à 550ᵏ (1/3) ; mais le mortier résiste bien moins à l'écrasement.

Si on augmente, au 1/3 par exemple, la quantité de chaux, on ne peut plus bourrer assez énergiquement.

Comme il s'agit de très petites quantités, la différence de dépense est insignifiante.

On matera donc toujours au ciment.

Art. 3. — Ordre des clavages. — On clave d'abord la clef, puis successivement tous les vides en descendant de chaque côté[58].

En général, on peut, au cerveau, enlever les taquets.

Aux coffrages inférieurs, on enlève les bois par chambres successives.

Le plus souvent, on ne commence le deuxième rouleau qu'après avoir clavé le premier[59].

55. — II, p. 139.

56. — On a clavé avec des coins en bois les petites voûtes de Luxembourg jusqu'au décintrement des grandes (II, p. 80).

57. — Annales des Ponts et Chaussées, 1904. 1er trimestre, p. 75 à 100 : « *Note sur le matage des joints de clavage dans les voûtes en maçonnerie* », M. Tourtay.

58. — Au pont d'Ouroux, sur la Saône (1905-10), on a fini par le 1/3 supérieur du joint de clef que l'on a maté modérément, et le 1/3 supérieur des joints de naissance, que l'on a maté énergiquement. (Note de M. Bouteloup, Ingénieur des Ponts et Chaussées, janvier 1909.)

59. — Aux ponts des Chemins de fer rhétiques, pour que le 1er rouleau ne se fendît pas sous le poids du 2e, on n'a fermé des joints secs du 1er rouleau qu'au moment de claver le 2e.
Schweizer Ingenieur-Kalender, 1912, p. 268.

Si les cintres ont été calculés pour la charge totale, on peut ne claver les joints de rupture qu'après achèvement du deuxième rouleau [60].

Art. 4. — Pratique des matages.

A. - Poids de ciment pour 1me le sable. — Avec 750^k, la résistance est moindre qu'avec 500^k [61] : un mortier trop riche se ramollit par le matage.

On mettra 500^k au moins, 600^k au plus [62].

B. - Sable. — Choisir le meilleur : le sable de calcaire broyé est parfois trop peu régulier.

C. - Quantité d'eau. — Le mortier doit être tel qu'on puisse le mater.

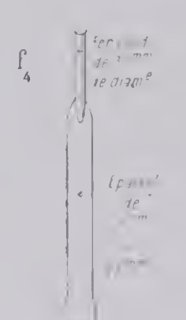
Il ne sera donc pas plastique comme le mortier ordinaire, mais sec, pulvérulent, à l'état de sable humide : comprimé à la main, il ne tient pas en boule.

Il y faut assez d'eau pour que le ciment prenne. Voici comment on l'évalue : le sable, même s'il paraît sec, retient toujours un peu d'eau, généralement plus de 4 % ; on la mesure en le faisant sécher au feu.

Dans les expériences faites, les quantités d'eau ont été les suivantes pour du mortier pulvérulent très sec [63] :

Dosage en poids		Poids approximatif de ciment pour 1^{mc} de sable (1500^k)	Quantités d'eau	
Ciment	Sable		pour % du poids du mélange sec	approximatives en litres pour 1^{mc} de sable (1500^k)
1	3	500^k	6.5 % [64]	130^l
1	2	750^k	7.5 %	169^l
Pour le dosage de 600^k, on aurait :				
1	2.5	600^k	7.0 % [65]	147^l

Il y a assez d'eau quand, sous l'action d'un matage énergique, le mortier « sue ».



D. - Instruments pour le matage. — Au pont des Amidonniers [66] (voûtes en moellons réguliers, à lits minces, bien équarris, pleins en queue), on a employé cinq types de matoirs en fer (f_4) :

largeur : 80^{mm}, 90^{mm}, 100^{mm}, 110^{mm}, 120^{mm}
épaisseur : 5^{mm}, 10^{mm}, 15^{mm}, 20^{mm}, 25^{mm}

60. — On a fait ainsi au pont de Marmande : ellipses de 3C^m à 1, 3,6.

61. — *Loc. cit. renvoi 57*, p. 79.

62. — Le dosage des joints secs était, comme pour tout le mortier de la voûte : 650^k aux ponts de Lavaur (II, p. 135), Antoinette (II, p. 145), du Gour-Noir (III, p. 103); 600^k aux ponts de Luxembourg (II, p. 67), des Amidonniers (I, p. 193), d'Avignon (III, p. 270), d'Ouroux sur la Saône (voir renvoi 75); 500^k au pont de Digoin sur la Loire (renvoi 75); 450^k au pont d'Arcial sur la Saône (renvoi 75).

63. — *Loc. cit. renvoi 57*, p. 78.

64. — Pour le même mortier, plastique, il fallait 11.2 % d'eau au lieu de 6.5 à 7.5 %.

65.

	Poids de ciment	Quantité d'eau	
		pour 1^{mc} de sable	% en poids du mélange
Ponts de Lavaur et Antoinette (II, p. 135 et 145)	650^k	130 à 150^l	6.04 à 6.65 *
Pont du Gour-Noir (III, p. 103)	650	117 à 156	5.44 à 7.77 **
Viaduc d'Arquejols (Langogne au Puy)	600	130 à 135	6.20 à 6.40 ***
Viaduc de Morez (Morez à Saint-Claude)	600	110 à 120	5.23 à 5.71 ****
Viaduc du Saillard (Morez à Saint-Claude)	600	108 à 120	5.14 à 5.71 ****

* Sable jugé sec sans expérience précise. ** Suivant l'état du sable. *** Sable séché. **** Sable séché au feu.

66. — I. p. 193.

Dans les voûtes en moellons ordinaires lités[67], il y a de grands joints : on emploie alors des matoirs épais, jusqu'à 50^{mm}[68].

Pour pouvoir mater, il faut des joints assez larges, 20^{mm} au moins si le rouleau est épais.

E. - Opération du matage. — Avant de mettre du mortier dans les joints secs, on les nettoie avec soin, on les arrose copieusement. Entre les parois très propres et encore humides, on introduit le mortier par petites hauteurs (2 à 3^{cm}) : on le régularise avec des fiches de fer ou des liteaux de bois.

D'abord, un homme pilonne vigoureusement au matoir chaque couche de mortier à coups répétés ; puis, quand le mortier commence à résister, un homme tient le matoir, un autre tape à grands coups de masse sur la tête du matoir[69]. A chaque coup de masse, le matoir doit être déplacé de la moitié de sa largeur. Il y a deux équipes pour chaque joint à mater, chacune commençant le matage du côté de la tête et se rejoignant vers le milieu.

On arrête le matage, pour chaque couche, au moment où le mortier sue un peu d'eau.

Puis on recouvre les joints matés avec du sable, des nattes, des paillassons, des chiffons, que l'on entretient mouillés, afin que le ciment prenne sous l'eau.

Une voûte bien matée sonne comme un arc en métal.

F. - Présence de l'Ingénieur. — L'Ingénieur a le devoir d'assister à tous les matages et de s'assurer *par lui-même* qu'ils ont été bien faits.

Art. 5. — Coût du m. q. de joint maté[70]. — Il a coûté :

$10^{f}70$ au Viaduc du Saillard[71] (1908-09) (une arche en plein cintre de 25^{m} et 4 de 12) } *Morez-*
$12^{f}40$ au Viaduc de Morez[71] (1910-11) (9 arches en plein cintre de 20^{m}) } *St-Claude*
$11^{f}10$ au Pont de Saint-Loup[71] (1912-13) (7 arcs de 33^{m} à 1/7,5), *La Ferté-Hauterive-Gannat.*

67. — Voir renvoi 76, p. 168.

68. — Viaduc d'Arquejols (Langogne au Puy, 1905-07), pleins cintres de 16^{m}.

69. — Sur la ligne de Morez à Saint-Claude, les matages ont été plus vite et mieux faits par des mineurs habitués à manier la masse, que par des maçons et leurs aides.

70. — Voir Pont sur le Verdon (I, 135).

71.

Surface des joints matés	Viaduc du Saillard 203mq 43				Viaduc de Morez 447mq 39				Pont de Saint-Loup 800mq 24			
	Quantités	Prix de l'unité	Dépenses partielles	Dépenses totales	Quantités	Prix de l'unité	Dépenses partielles	Dépenses totales	Quantités	Prix de l'unité	Dépenses partielles	Dépenses totales
Fournitures :												
Ciment Vicat	$27^{k}3$	$0^{f}07$	$1^{f}91$		$20^{k}7$	$0^{f}07$	$1^{f}45$		25^{k}	$0^{f}05$	$1^{f}25$	
Sable	$0^{mc}055$	9. »	0.49		$0^{mc}039$	9 »	0.35		$0^{mc}041$	1.25	0.05	
Plomb (bandes ou tuyaux	$3^{k}03$*	0.90	2.73		1^{k} **	0.90	0.90		$0^{k}89$	0.67	0.59	
Acier forgé } Réparation des	$0^{k}04$	1.20	0.05		$0^{k}11$	1.20	0.13		»	»	»	
Fer forgé } matoirs, barrettes.	»	»	»		$0^{k}04$	0.80	0.03		»	»	»	
Huile	»	»	»	$5^{f}97$	»	»	»	$3^{f}15$	$0^{k}01$	0.60	0.01	$2^{f}97$
Charbon	»	»	»		»	»	»		$0^{k}75$	0.04	0.03	
Chiffons, étoupes	$0^{k}47$	0.50	0.23		$0^{k}18$	0.50	0.09		$0^{k}75$	0.08	0.05	
Liteaux	$2^{m}59$	0.20	0.52		$0^{m}99$	0.20	0.20		»	»		
Coins en bois	0.37	0.10	0.04		»	»	»		»	»	0.98	
Coins en fer, barrettes, matoirs***	»	»	»		»	»	»		»	»		
Main-d'œuvre :												
Chef de chantier	»	»	»		»	»	»		$0^{h}2^{m}$	0.90	0.03	
Maçons	»	»	»		$3^{h}8^{m}$	0.80	2.51		$2^{h}17^{m}$	0.74	1.69	
Manœuvres	$7^{h}5^{m}$	0.58	4.11	$4^{f}17$	$10^{h}19^{m}$	0.58	5.98	$8^{f}66$	$8^{h}14^{m}$	0.46	3.79	$6^{f}06$
Forgerons	$0^{h}5^{m}$	0.80	0.07		$0^{h}13^{m}$	0.80	0.17		»	»	»	
Assurance 10 %	»	»	»		»	»	»		»	»	0.55	
Outils et faux-frais (1/20 environ)	»	»	»	$0^{f}55$	»	»	»	$0^{f}59$	*Frais génér. 13 % et bénéfice 10 %*			$2^{f}07$
Totaux				$10^{f}70$				$12^{f}40$				$11^{f}10$

* Bandes de $25^{mm} \times 20^{mm}$. ** Tuyaux à gaz, meilleurs et moins chers que les bandes.
*** Au Saillard, puis à Morez, on a fait les matages en régie. — Les barrettes, coins, matoirs ont coûté $3709^{f}76$ ($4637^{k}20$ à $0^{f}80$).

§ 5. — *ON PEUT CONSTRUIRE PAR TRANCHES SANS CONSTRUIRE PAR ROULEAUX*

Le sectionnement en tranches n'implique pas la construction par rouleaux : on peut fort bien établir des coffrages sur toute l'épaisseur de la voûte et la construire d'un seul coup[72, 73].

Mais ce joint est plus profond, donc plus difficile à bourrer ; comme les reprises sont moins faciles, on en fera moins ; on perd le bénéfice des rouleaux : légèreté des cintres, prompte fermeture de la voûte.

§ 6. — *ON PEUT CONSTRUIRE PAR TRANCHES QUELS QUE SOIENT LES MATÉRIAUX DE LA VOUTE*

J'écrivais en 1886[74] : « *Le sectionnement des voûtes en tronçons.... s'applique » facilement aux voûtes en moellons ordinaires* » et « *restreint pour le corps de » la voûte l'emploi des moellons d'appareil aux seuls clavages* ».

Depuis, on a construit par tranches quantité de voûtes en moellons ordinaires[75] ; on en a même clavé en moellons ordinaires[76, 77].

Je préfère, pour un bourrage exact, claver en moellons équarris.

Dans les voûtes en briques, on ménage et on remplit facilement les joints vides[78, 79].

72. — Voûtes > 40m construites par tranches, à pleine épaisseur :

Intrados		Ponts	Dates	Voir			Portée	Épaisseur à la clef	Nombre de	
				Tome	pages				tronçons	clavages
					Tableau synopt.	Monographie				
Arcs	peu surbaissé	Wäldlitobel	1883-84	II	121	157	41m	1m70	4	»
	assez surbaissé	Plauen	1903-05		15	56	90	1.50	6	11
	très surbaissés	Teinach	1882	III	193	204	46	1.00	2	3
		Boucicaut	1888-90		231	248	40	1.05	6	7
		Orléans	1904-05		233	260	43.85	1.25	10	11
		Avignon	1905-09		235	272	40	1.05	8	9

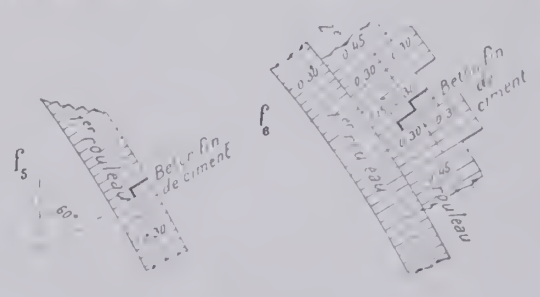
73. — Au pont d'Ouroux (voir renvoi 58), les trois premières voûtes ont été construites à pleine épaisseur, joints vides à la clef et à l'about de chaque vau.

74. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 472, p. 501 : « *Construction des ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette* », M. Séjourné.

75. — Claix, arc de 52m à 1/6,46 (III, 36) ; Marmande, ellipses de 36m à 1/3, 6....

76. — Voûtes clavées en moellons ordinaires (M. l'Ingénieur en chef Tourtay) :

Intrados	Ponts :	Dates	Nombre d'arches	Portée	Surbaissement
Arcs très surbaissés	Iguerande, sur la Loire	1897-99	7	28m60	1/7,95
	Arciat, sur la Saône	1900-04	7	31	1/7,12
	Digoin, sur la Loire	1904-08	9	26	1/7,4
Anses de panier	Ouroux, sur la Saône	1906-10	5	33, 35, 38	1/4,53, 1/4,36, 1/4,3



77. — Nous avons ainsi clavé la voûte de 25m de l'Arconce, 1898 (Ligne de Paray-le-Monial à La Clayette) ; celle de 35m du Sornin, 1897 (Ligne de La Clayette à Lamure).

78. — Diveria (III, 85).

79. — A Saint-Waast (Ligne de Montauban à Castres), pleins cintres de 20m, construits en trois rouleaux de briques, sur des cintres très légers, on a simplement posé, au droit des points fixes, une demi-brique, et bourré ensuite le complément de l'épaisseur avec du béton fin de ciment (f_5, f_6).

§ 7. — *RÉACTIONS NORMALES AUX LITS*
CRÉÉES PAR LE MATAGE DES JOINTS VIDES AU MORTIER PULVÉRULENT

M. Tourtay et moi, avons demandé à M. Mesnager de faire, au Laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées, des expériences pour les évaluer[80]. En voici le résultat :

En bourrant fortement un joint de 15^{mm} environ d'épaisseur avec du mortier de ciment sec[81], à 1 3 en poids (soit environ 550^{k} pour 1^{mc} de sable), on peut déterminer dans la maçonnerie une pression de 15 à 16^{k} par $\overline{0^{m}01}^{2}$.

Si, au lieu de bourrer un joint régulier de 15^{mm} environ d'épaisseur, on bourre un joint très irrégulier de 12^{mm} à 55^{mm}, on peut obtenir encore, avec du ciment de mortier au 1 3, sec, une pression de 8 à 10^{k} par $\overline{0^{m}01}^{2}$.

Ainsi, avec des matages bien faits, en nombre suffisant et aux points convenables, l'Ingénieur peut, à son gré, modifier la courbe de pression[82].

Les joints vides sont aux points les plus fixes du cintre. Ce sont ces points-là qu'on abaisse au décintrement.

C'est là que s'exercent les plus grands efforts, que doivent se produire, par conséquent, les plus grands tassements. Si donc les joints ont été fortement bourrés, on a créé des réactions normales au lit, soulagé le cintre et amorcé le décintrement, qui s'achèvera sans tassement appréciable[83].

§ 8. — *CONCLUSION :*
ADOPTION SYSTÉMATIQUE DES CLAVAGES MULTIPLES

En résumé, le système des clavages multiples :

localise les fissures pendant la construction et en assure à temps le parfait remplissage ;

80. — M. Tourtay en a rendu compte dans les Annales des Ponts et Chaussées, 1904, 1er trimestre, p. 75 à 100 : « *Note sur le matage des joints de clavage dans les voûtes en maçonnerie* ».

81. — Par rapport au mortier plastique à environ 11 % d'eau, la résistance du mortier sec (6,5 % d'eau), pilonné, est augmentée : à l'arrachement, de 30 à 40 % ; à l'écrasement, de 170 à 220 %.

82. — On a pu ainsi fermer au mortier sec une fissure ouverte *à l'intrados* d'un passage supérieur de 12^{m} (Ligne d'Etampes à Beaune-la-Rolande).
Annales des Ponts et Chaussées, 1905 (II, p. 232, 234, 240, 241).

83. — Voici pour 24 ponts, les tassements au décintrement t. de voûtes ⩾ 40^{m} construites par tronçons :

Intrados	Ponts :	Tome, page	Portée	t_v	Intrados	Ponts :	Tome, page	Po tée	t_v
Plein cintre	Solis	55	42^{m}	0^{mm}	Arcs assez surbaissés	Gour-Noir	103	62^{m}	$1^{mm}3$
Ellipses surbaissées	Amidonniers	I 193	42-46	0 à 2.3		Pouch	110	47.85	2.2
	Verdon	133	40	0.6		Krenngraben	134	40	2
Ellipses surbaussée	Wiesen	235	55	0		Salcano	141	85	6
Arcs peu surbaissés	Lavaur	135	61.50	0.6		Langenbrand	152	59	1 à 2
	Antoinette	145	50	0.6		Lusserat	III 155	45.70	3.6
	Céret	160	45	0		Lichtensteig	161	42.82	0
	Luxembourg	67	84.65	6 et 5		Krummenau	164	63.26	3.2
	Rothweinbach	II 171	41	0		Guggersbach	59	50.20	0
	Escot	174	56	0		Montanges	62	80.29	0.2 à 0.4
	Ramounails	186	40.30	1.6		Seythenex	177	41.19	0
	Cinuskel	189	46.98	0					
	Tuoi	194	47.71	0					

crée, entre les voussoirs des clavages, des réactions qui soulagent le cintre et préparent le décintrement, en réduisent le tassement et préviennent les fissures ;

hâte l'exécution de la voûte, puisqu'on y peut faire autant d'attaques que de vaux [84] ;

ne laisse guère subsister, au décintrement, que les déformations élastiques.

Il s'applique, convenablement modifié, aux voûtes de toute ouverture, construites par rouleaux ou à pleine épaisseur, en moellons ordinaires ou d'appareil, à mortier de chaux ou de ciment, sur cintres fixes ou retroussés.

Enfin la maçonnerie des clavages est la meilleure de la voûte.

Nous l'appliquons systématiquement à *toutes* nos voûtes [85].

CHAPITRE III

QUELQUES PRÉCAUTIONS

Nos ciments sont durs : on ne peut dégrader les joints sans faire éclater la pierre. On disposera dans tous les joints vus des liteaux en sapin ayant une épaisseur un peu inférieure à celle du joint.

A l'extrados, les joints seront tenus creux et bien lissés pour découvrir de suite les fissures qui pourraient se produire et qu'on explique trop facilement par le retrait du mortier.

Dans les reprises des tronçons, tous les vieux mortiers sont repiqués et les joints secs lavés à grande eau.

Tous les voussoirs doivent être vigoureusement assujettis par de forts maillets en bois qui répartissent bien le choc sans écraser la pierre ; on l'impose dans le Cahier des Charges : on ne l'obtient guère.

84. — A Luxembourg, il y avait 10 attaques simultanées, 20 tronçons : on a fait chaque rouleau en 8 à 10 jours et la voûte entière en un mois et demi (II, p. 78).

85. — Dans les souterrains, nous matons de même le joint de reprise des pieds-droits sous la calotte de la voûte.

DÉCINTREMENT

CHAPITRE I

MEILLEURE ÉPOQUE A CHOISIR, QUAND ON EST LIBRE, POUR CLAVER ET DÉCINTRER

Le froid contracte les matériaux, abaisse la clef des voûtes, fend les tympans, les corniches ; la chaleur dilate les matériaux, élève la clef des voûtes, resserre les tympans, les corniches.

C'est le froid qui est dangereux.

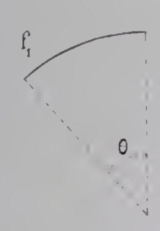
C'est donc en hiver, quand la clef est basse, les matériaux contractés, qu'il conviendrait de claver la voûte et de construire les tympans : mais il est assez rare qu'on le puisse.

Au décintrement, la voûte se contracte par sa mise en pression et s'abaisse : s'il fait plus froid qu'au clavage, elle s'est encore contractée par le froid : les deux abaissements s'ajoutent [1] ; s'il fait plus chaud, elle s'est dilatée : les deux effets se contrarient [2].

Si on décintre en été, le soleil a pu contracter le cintre en desséchant ses bois : c'est ainsi que se sont décintrées, toutes seules, la voûte de la Gravona [3], toutes les voûtes de Constantine [4].

CHAPITRE II

ÉTAT D'AVANCEMENT DES TYMPANS AU MOMENT DE DÉCINTRER



On a souvent décintré les pleins cintres et les arcs peu surbaissés, les tympans montés jusqu'à 60° de la clef; les ellipses, les tympans faits jusqu'au milieu de la montée ; nus, les arcs pour lesquels θ est $<$ 60° (f_1).

Quelquefois, avant de décintrer, on a chargé le cerveau [5] : on a élevé, sur le dos de la grande voûte, des piles de voûtes d'élégissement [6].

Si on a cambré la voûte pour une certaine disposition des charges, il faut, avant de décintrer, mettre dessus ces charges-là [7].

C'est ainsi qu'on a décintré : le pont Boucicaut [8], les tympans montés jusqu'au niveau de l'extrados ; le pont de Luxembourg [9], quand les petites voûtes étaient fermées sur cintre, clavées seulement avec des coins ; l'ogive du pont de Fontpédrouse [10], la clef chargée d'une pile de 15^m de hauteur.

1. — On a dû, à Luxembourg, claver par la chaleur et décintrer par le froid.

2. — Au Castelet (41^m), décintré en hiver, tassement de 2^{mm} (II, 117). Au pont de Lavaur (61^m 50), clavé par 12° de froid, décintré en été, tassement de 0^{mm}6 (II, 119).

3. — II, 185. 4. — II, 113. 5. — Crespano (II, 11) ; Gour-Noir (III, 81).

6. — Sidi-Rached (II, 65) ; Schalchgraben (II, 121) ; Rothweinbach (II, 123) ; Escot (II, 123) ; Ramounails (II, 179) ; Steyrling (III, 87) ; Salcano (III, 87) ; Lichtensteig (III, 89) ; Krummenau (III, 91).

7. — Voir Tome III, p. 367 : Relation entre quelques formes de funiculaires et quelques dispositions des charges.

8. — III, 249. 9. — II, 80. 10. — V, 90.

Quelquefois, on a décintré, les tympans faits[11] et même l'ouvrage achevé[12].

Si on ne ménage pas de joints de dilatation, il convient que la voûte ait été maçonnée au ciment, qu'elle ait été clavée et les tympans faits par le froid ; sinon, l'hiver suivant, les tympans se fendront.

S'ils sont coupés par un joint de dilatation, on peut les achever avant de décintrer[13].

CHAPITRE III

TEMPS PENDANT LEQUEL ON LAISSE LA VOÛTE SUR CINTRE

Les anciennes voûtes étaient en chaux grasse, qui ne faisait prise que très lentement. On décintrait, les mortiers encore plastiques, et on ne s'effrayait pas si une voûte tassait de 1 pouce par toise, soit de 1/144e de sa portée[14].

Avec nos chaux, qui prennent en moins de deux jours, surtout avec nos ciments, qui prennent en moins de douze heures, on décintre toujours le mortier pris : il faut qu'il le soit assez pour résister ; on attend le plus qu'on peut.

La règle attribuée à Morandière, — un jour sur cintre par mètre de portée, — est tout juste suffisante, même pour une voûte à ciment.

Il faut plus attendre en hiver qu'en été.

Il faut plus attendre pour une voûte en béton que pour une voûte appareillée : il y a plus de mortier ; il y durcit moins vite.

Toutes les fois qu'on décintre trop tôt, des joints s'ouvrent[15].

Il faut décintrer très doucement, sans choc. Quand une crue décintre brusquement, il y a danger de fissures[16].

Les voûtes construites par rouleaux doivent rester longtemps sur cintre. Il faut, en effet, qu'au moment du décintrement, les mortiers des maçonneries, suivant une même normale à l'intrados, aient fait une prise à peu près égale, c'est-à-dire que l'intervalle entre leur exécution soit négligeable devant le temps laissé sur cintre.

11. — Alma (I, 139) ; Mantes (I, 141) ; Jaremcze (III, 83) ; Jamna (III, 83) ; Svenkerud (III, 87).

12. — Annibal (I, 89) ; Diable (I, 89) ; Verdon (I, 129).

13. — *Voûtes inarticulées :* Connecticut (I, 61) ; Guggersbach (III, 15) ; Gutach (III, 85) ; Elsen (III, 287) Cassel (III, 287).

Voûtes articulées : Garching (IV, 93) ; Grasdorf (IV, 125) ; Wallstrasse (IV, 125) ; Hochberg (IV, 167) ; Cornélius (IV, 167) ; Elise (IV, 127) ; Illerbeuren (IV, 157) ; Reichenbach (IV, 169) ; Maximilien (IV, 169) ; Wittelsbach (IV, 171) ; Moulins-lez-Metz (IV, 171) ; Gräveneck (IV, 211) ; Inzigkofen (IV, 221) ; Neckarhausen (IV, 221) ; Prince-Régent (IV, 223) ; Max-Joseph (IV, 223).

14. — A Neuilly, — 5 voûtes de 120 pieds (39m) en anse de panier au 1/4, — on clava le 26 juillet 1772 : on commença le decintrement le 14 août, 18 jours après ; on l'acheva le 3 septembre. Le tassement a été :

immédiatement après la pose de la clef........	10	pouces	5	lignes	(0m282)
au commencement du décintrement...........	12	—	6	—	(0m338)
apres décintrement..............................	18	—	6	—	(0m500)
après la pose du pavé et des parapets.........	22	—	»	—	(0m595)
5 ans apres achèvement du pont..............	23	—	6	—	(0m636)

Perronet : *Description des Projets et de la Construction des ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres....* Tome I. — Imprimerie Royale, MDCCLXXXII, p. 49 et 107.

Voici les tassements de l'arche centrale du pont de Mantes (120 pieds), 1764 :

avant le decintrement..........................	13	pouces	6	lignes	(0m365)
après le décintrement,........................	18	—	6	—	(0m500)
15 mois après..................................	20	—	7	—	(0m557)

Perronet, *loc. cit* p. 73.

15. — Plein cintre de 25m de l'Evalude (Ligne de Morbier à Morez), clavé le 26 septembre 1898, décintré le 30 : fissures de 1mm à l'extrados, à 44° et 35° de la clef. (Tassement de la clef : 8mm.)

16. — Pont de Verdun-sur-le-Doubs (I, 167).

TASSEMENT DE LA CLEF AU DÉCINTREMENT

Nota. — Dans les Tableaux, § 1, § 2, on a écrit en caractères gras ce qui concerne les voûtes que l'on sait avoir été clavées en plusieurs points au mortier de ciment sec maté. Pour la nature des matériaux et la composition du mortier des voûtes de 40ᵐ et plus, voir Tableaux, p. 8, 9, 10.

§ 1. — *VOUTES INARTICULÉES*

Art. 1. — Voûtes à mortier de chaux.

Matériaux du queutage	Ponts : *Les chiffres après les noms des ponts indiquent, pour les voûtes de 40ᵐ et plus, le Tome et la page du Tableau synoptique.*	Dates	Intrados	Portée	Surbaissement	Temps sur cintre après clavage, en jours	Date du décintrement	Tassement en *mm* au décintrement	Provenance et *marque* de la chaux
	A. — Chaux grasse.								
PT	Lavaur (Vᵗ Pont), I, 86	1773-91	Anse de panier	48ᵐ73	1/2.5	1145 j.	juin	65ᵐᵐ	
PT	Mosca, III, 192	1834	Arc de cercle	45	1/8.18	20		153	
MAV	Chester, III, 10	1833-34	Arc de cercle	60.96	1/4.76	»		63 à 67	pays
Br	Annibal, I, 88	1868-70	Anse de panier	55	1/3.92	217	6 avril	69	[16]
Br	Diable, I, 88	1871-72	Anse de panier	55	1/4.06	88	20 octobre	115	[17]
	B. — Chaux maigre.								
Br	Bains-de-Lucques, III, 10	1874-77	Arc de cercle	47.84	1/6.71	12	10 août	183	
	C. — Chaux hydraulique.								
MAV	(Vᵗ de) la Gascarie [18]	1894-97	Plein cintre	20	»	10		< 18	Teil
MEV	Lanne [19]	1871	Anse de panier	24	1/3.2	»		19 à 79	Échoisy
MEV	Saulnier, III, 12	1882	Arc de cercle	43	1/5	39	octobre-nov.	52	
MEV	Losde [20]	1882-83	Arc de cercle	30.60	1/5	60	10 août	95	Teil
MEV	Pouch, III, 82	1890	Arc de cercle	47.85	1/3.68	55	4 août	2.2	Teil
MEV	**Amélie-les-Bains** [21]	1890-92	Plein cintre	**26**	»	30		**1**	Teil
MEV	(Vᵗ de) Saint-Georges [22]	1898	Plein cintre	16	»	8 à 14	février-mars	0.3 à 2	Teil
MEV	(Vᵗ de) Mouillero [22]	1898	Plein cintre	16	»	8 à 14	février-mars	1 à 1.6	
MOV	Chalonnes [23]	1863-65	Ellipse	30	1/4 (Sur 17 arches)	tassement max. 18 min. 196 moy. 67	21 novembre 28 juin	98 8 36	Doué
MOV	Port-Sainte-Marie [24]	1876-77	Ellipse	32	1/3.2 (Sur 8 arches)	tassement max. 20 min. 44 moy. 28	15 janvier 28 décembre	28 0 11	Teil
MOV	Saubusse [25]	1880-82	Ellipse	24	1/3.3 (Sur 15 arches)	tassement max. 35 min. 35 moy. 33	13 mai 2 juin	80 20 36	Saint-Astier
	Bléré [26]	1897-1900	Anse de panier	24	1/3.65	< 32		16	Teil
	Vᵗ du Saillard [27]	1909	Plein cintre	**25**	»	50	10 décembre	**0**	Teil
	Calcio, III, 80	1877-78	Arc de cercle	42	1/3.53	32		48	Pallazzolo
Br	Belleperche [28]	1898	Ellipse	33	1/4	tassement max. 11 min. 62	20 octobre 3 février	119 48	Teil
Br	(Vᵗ des) Calvets [28]	1898	Ellipse	27	1/4	tassement max. 17 min. 30	21 janvier 4 mai	53 8	Teil
Br	(Vᵗ de la) Samponne [28]	1898	Ellipse	27	1/4	tassement max. 47 min. 35	8 mars 12 juillet	112 11	Teil
	Diveria, III, 84	1901-02	Arc de cercle	40	1/4	15		60	Palazzolo

Art. 2. — Voûtes à mortier bâtard.

Matériaux du queutage	Ponts	Dates	Intrados	Portée	Surbaissement	Temps sur cintre	Date du décintrement	Tassement	Provenance
MOV	Oloron, I, 38	1881-82	Plein cintre	40	»	59		3	

16. — On a ajouté à la chaux grasse du ciment de Vassy : 1/8 en volume pour le 1ᵉʳ rouleau, 1/4 pour le 2ᵉ, 1/2 pour le 3ᵉ (I, 88). C'est pour cela que le pont Annibal a été indiqué, au tableau de la p. 9, dans les voûtes à mortier bâtard.

17. — On a ajouté à la chaux grasse un peu de chaux du Teil : 1/8 en volume pour le 1ᵉʳ rouleau, 1/4 pour le 2ᵉ, 1/3 pour le 3ᵉ (I, 88).

18. — Ligne de Carmaux à Rodez (Exposition 1900 : Notice, Travaux publics, p. 555). 19. — Route nationale nᵒ 117 de Bayonne à Perpignan (id. 1878, p. 20).

20. — Ligne de Tarascon à Ax. 21. — Ligne d'Elne à Arles-sur-Tech (id. 1900, p. 12). 22. — Ligne de Quillan à Rivesaltes (id, p. 592, p. 596).

23. — Ligne d'Angers à Niort (Morandière, Construction des Ponts, Tome I, p. 374).

24. — Ligne de Condom à Port-Sainte-Marie (Exposition 1878 : Notice, Travaux publics, p. 306).

25. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1885, p. 645 : Note sur la Construction du Pont Saint Jean sur l'Adour, à Saubusse (Landes). M. Trepied, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

26. — Route nationale nᵒ 76 de Nevers à Tours (Exposition 1900 : Notice, Travaux publics, p. 16). 27. — Ligne de Morez à Saint-Claude.

28. — Ligne de Castelsarrazin à Beaumont.

§ 1. — *VOUTES INARTICULÉES (Suite)*

Art. 3. — Voûtes à mortier de ciment.

Matériaux du queutage	Ponts : *Les chiffres après les noms des ponts indiquent, pour les voûtes de 40m et plus, le Tome et la page du Tableau synoptique.*	Dates	Intrados	Portée	Surbaissement	Temps sur cintre après clavage, en jours	Date du décintrement	Tassement en *mm* au décintrement	Provenance et *marque* du ciment
	Signac, I, 128	1871-72	Anse de panier	40m	1/3.25	68 j.	3 avril	0mm	Boulogne
	Teinach, III, 192	1882	Arc de cercle	33 apparente	1/10	42		43	
	Empereur-François, I, 140	1898-1901	Anse de panier	42.34	1/4.95	8	9 décembre	21	
	Gutach, III, 84	1899-1900	Arc de cercle	64	1/3.97	27	9 juin	21	Schiffer-decker
	Schwändeholzdobel, III, 84	1899-1900	Arc de cercle	57	1/4	42	13 juillet	21	Schiffer-decker
PT	Strandeelven, III, 84	1902-04	Arc d'anse de p.	41	1/3.64	357	14 septembre	1.5	
	Steyrling, III, 86	1904-05	Arc de cercle	**70**	1/4.45	»	été	**9**	
	Salcano, III, 86	1904-06	Arc de cercle	**85**	1/3.90	38	8 août	**6**	Spalato
	Svenkerud, III, 86	1905-07	Arc d'anse de p.	44	1/6.66	108	2 mai	5.5 à 7	
	Seythenex, III, 170	1908-11	Arc de cercle	41.19	1/4.10	15	30 novembre	0	*Vicat*
	Céret, II, 120	1883-85	Arc de cercle	**45**	1/2.31	79	30 janvier	**0**	
L	Bellows-Falls, III, 222	1899	Arc de cercle	42.67	1/7	arche est : 21 arche ouest : 30		0	
	Montanges, III, 16	1908-09	Arc de cercle	**80.29**	1/3.92	68	7 novembre	**0.2 à 0.4**	*Vicat*
	Krummenau, III, 90	1910-11	Arc d'anse de p.	63.26	1/4.57	29	8 septembre	3.2	
	Boucicaut, III, 230	1888-90	Arc de projection de chaînette	**40**	1/8	229-207 185-67	5 juin	8, 13 6, 11	*Vicat*
	Saint-Martin-Lys [29]	1896		34	1/3.84	26	3 février	0.8 à 2.4	
	Luxembourg, II, 60	1899-1903	Arc cambré	**84.65**	1/2.73	voûte aval : 93 voûte amt : 10	octobre septembre	6 5	*Vicat*
MAV	**Orléans**, III, 232	1904-06	Arc de projection de chaînette	**43.85**	1/7.56	73-63-54 68-62	29-31 mai 24-25 juillet	**8-6.6-8.3** **5-7.4**	*Candlot*
	Avignon, III, 234	1905-09	Arc de projection de chaînette	**40**	1/8 sur 10 voûtes	tassement max. 76 min. 86 moy. 89	18 novembre 23 juillet	17.6 6 10.7	*Parin de Lafarge maritime*
	Cinuskel, II, 178	1910-12	Arc d'anse de panier	46.98	1/2.32	10	6 juillet	0	
	Tuoi, II, 180	1911-12	Arc d'anse de panier	47.71	1/2.23	11	5 août	0	
	Eaux-Salées [32]	1911-13	Plein cintre	**50**	»	38	12 août	**0.1 à 0.3**	
	Castelet, II, 116	1882-83	Arc de cercle	**41.20**	1/2.94	60	26 janvier	**2**	
	Lavaur, II, 118	1882-84	Arc de cercle	**61.50**	1/2.24	135	7 mai	**0.6**	
	Antoinette, II, 118	1883-84	Arc de cercle	**50**	1/3.14	99	10 septembre	**0.6**	*Vicat*
	Gour-Noir, III, 80	1888-89	Arc de cercle	**62**	1/3.73	52	28 septembre	**1.3**	
	Villefranche-de-Conflent [31]	1889-91	Arc de cercle	39.35	1/2.31	53	22 juillet	1.9	
	Verdun-sr-le-Doubs, I, 140	1895-97	Ellipse	41	1/4.47	48	7 octobre	amont : 19 aval : 24	*Vicat*
	Axat [30]	1898-99	Plein cintre	30	»	29	22 juin	0.7 à 1	
	Aliès [30]	1898-99	Plein cintre	30	»	33	1er septembre	0.6 à 0.7	
	Rébuzo, I, 38	1898-1900	Plein cintre	40	»	30	17 mai	1.2	Teil *(grappier)*
MEV	**Valence**, I, 142, voûtes de rive	1901-05	Arc d'anse de panier, puis de parabole	**49.20**	1/4.65	292 (RD) 29 (RG)	8 août 14 mars	20 33	
	Valence, I, 142, voûtes interm.	1901-05	Arc d'anse de panier, puis de parabole	**49.20**	1/4	505 (RD) 39 (RG)	26 février 26 mars	33 3	
	Amidonniers, I, 188	1904-07	Ellipse aplatie aux reins	**46**	1/4.17	299 236	11 mars 22 décembre	0 0	*Vicat*
				42	1/4.10	159-169 125-131	23 août 8 mai	0 0.9 à 1.8, 1.6 à 2.3	
				38.50	1/4.08	223-232 100-107	23 août 19 juin	0 - 0 0.4 à 0.8, 0.7 à 1.5	
	Verdon, I, 128	1905-06	Ellipse	**40**	1/4	35	19 septembre	**0.6**	
	Ramounails, II, 178	1906-08	Arc d'anse de p.	**40.30**	1/3.12	23	18 juillet	**1.6**	
	Escot, II, 122	1907-09	Arc de cercle	**56**	1/2.99	89	10 octobre	**0**	*(laitier)*
	Lichtensteig, III, 88.	1907-09	Arc de cercle	42.82	1/3.71	»	juin	0	

29. — Ligne de Quillan à Rivesaltes (Exposition 1900, Notice Travaux publics, p. 582). 30. — id. (id., p. 585, 590).
31. — Ligne de Prades à Olette (id., p. 617). 32. — Ligne de Miramas à L'Estaque. — Voir APPENDICE.

§ 1. — *VOUTES INARTICULÉES (Suite)*

Art. 3. — Voûtes à mortier de ciment *(Suite)*.

Matériaux du queutage	Ponts : *Les chiffres après les noms des ponts indiquent, pour les voûtes de 40m et plus, le Tome et la page du Tableau synoptique.*	Dates	Intrados	Portée	Surbaissement	Temps sur cintre après clavage, en jours	Date du décintrement	Tassement en *mm* au décintrement	Provenance et *marque* du ciment
MOV	Berdoulet, II, 116	1860-61	Arc d'anse de p.	40m	1/3.44	20 j.		10mm	
	Clair, III, 12	1873-74	Arc de cercle	52	1/6.46	42	10 avril	1 à 2	*Vicat*
	Ile-Verte, à Grenoble	1896-99	Arc	39.20 et 37	1/7.84, 1/7.54		3 février	0 à 5	
	Solis, I, 52	1901-02	Plein cintre	42	»	21	21 juin	0	
	Palmgraben, II, 120	1904-05	Arc de cercle	49	1/3.39		20 août	3	
	Krenngraben, III, 86	1904-05	Arc de cercle	40	1/4		8 mai	2	
	Lusserat, III, 88	1908-10	Arc de cercle	45.70	1/4.63	18	26 octobre	3.6	Boulogne
Petits MOV	Plauen, III, 14 (45 % de mortier)	1903-05	Arc d'anse de p.	90	1/5	8 mois	juillet	82	cerveau : *Stern*; reins. *Vorwohler*
Br	Gimone	1874-75	Ellipse	33	1/3.14	58 j.	9 mars	3 à 4	
B	Weisenbach, III, 216	1885	Arc	40	1/8	1		0	*Dyckerhoff et fils*
	Bellefield, III, 14	1896-97	Arc de cercle	45.72	1/4.10		sept.-octobre	47.2	
	Ave du Connecticut, I, 60	1899-1901 1904-1908	Plein cintre	45.72	»		commencement de l'été	< 2	
	Big Muddy River, I, 222	1901-03	Ellipse	42.67	1/4.67	voûtes: nord 178, centr. 41, sud 102	19, 15, 15 janvier	67 à 70, 21.3 à 24.1, 51.5	
	Mehring, III, 230	1903-04	Arc d'anse de panier	46	1/7.45	49-46-57-63		8-30-10-15	
	Schweich, III, 234	1905-06	Arc d'anse de panier	46	1/7.45	»		20	
	Guggersbach III, 14	1906	Arc de cercle	50.20	1/6.19	92	15 décembre	0	
	Walnut Lane, II, 62	1906-08	Arc d'anse de panier	70.71	1/3.32	1re vte : 1 mois; 2e vte : 6 semnes	juillet; novembre	3.2; 3.2	
	Trittenheim, III, 234	1907-08	Arc d'anse de panier	46	1/7.45			20	
	Wiesen, I, 232	1907-09	Ellipse surhssée	**55**	1/1.65	4	14 octobre	**0**	
	Avenue Edmondson, I, 90	1908-09	Arc d'anse de panier	42.37	1/3.17	½ vte nord 83	3 mars	61	*Alpha*
	Rocky River, II, 62	1908-10	Arc d'anse de panier	85.34	1/3.46	vte sud 19	28 septembre	11.6	
	Longuich, III, 236	1909-11	Arc de cercle	46	1/7.45		15 septembre	20	
B peu armé	Boberullersdorf, III, 286	1908-09	Arc d'anse de panier	58.10	1/6.31	1 mois 1/2	août	100	
	Elsen, III, 286	1909-10	Arc d'anse de panier	46	1/9.02	1 mois 1/2	octobre	110	
	Cassel, III, 286	1909-10	Arc d'anse de panier	57.50	1/10.99	1 mois 1/2	août	40	*Vorwohler*
	Spokane, III, 284	1909-11	Arc de cercle	85.65	1/2.47		8 juin, 10 août	0	

Art. 4. — Que conclure des tassements observés ? —

On constate ce qu'il était facile de prévoir.

Le tassement est plus grand avec mortier de chaux qu'avec mortier de ciment; plus grand pour les voûtes en briques, parce qu'elles ont beaucoup de joints; plus grand en hiver qu'en été.

On le réduit à très peu de chose par les clavages multiples au mortier de ciment sec.

A le calculer d'avance d'après l'intrados, les matériaux, l'époque du clavage et du décintrement, on perdrait son temps.

§ 2. — *VOUTES ARTICULÉES (mortier de ciment)*

Matériaux du queutage	Ponts :	Tome IV, page	Dates	Intrados	Portée entre appuis	Entre rotules Portée	Entre rotules Surbaissement	Temps sur cintre après clavage, en jours	Date du décintrement	Tassement en *mm* au décintrement	Provenance et *marque* du ciment
PT	Höfen	38	1885	Arc très surbaissé	41m	28m	1/10	35 j.		amont 42mm5, aval 38mm	Blaubeuren
	Baiersbronn	38	1889		40	33	1/10	28		92mm	
	Prince-Régent	222	1900-01		62.40	63	1/9.69	55	29 mai	34	Karlstadt *Dyckerhoff et fils*
	Max-Joseph	222	1901-02		64	60	1/10	42	25 juin	35 | 37	*Dyckerhoff et fils*
	Morbegno	62	1902-03		70	66	1/7	28	4 mai	126	
	Cornelius	166	1902-03		44	41	1/12	28	8 mai	22	
	Maximilien	168	1903-05		45.87	44	1/8.98	50	13 juin	20	
MEV	Marbach	38	1886-87		43.50	32	1/10.32	42		39	
MOV	Göhren	124	1903-04		60	60.56	1/8.89	42	1-2 décemb.	31.3	
B	Munderkingen	52	1893		59	50	1/10	28	4 septembre	30 | 38	Ehingen, Blaubeuren
	Inzigkofen	220	1895		47.90	43	1/9.81	35	12 octobre	7.5 | 7.7	Blaubeuren
	Coulouvrenière	78	1895-96		40	40	1/7.41	voûte RD : 79 — RG : 71	9 décembre 28 janvier	21.5 31.2	Reuchenette Le Pasquier
	Neckarhausen	220	1899-1900		59.40	50	1/11	56	28 août	12.1 | 12.5	Blaubeuren
	Grasdorf	124	1899-1900		40	40.39	1/8.93	49	12 septemb.	24	
	Malling	166	1899-1901		40	40.50	1/8.56	»		»	
	Hochberg	166	1901-03		39.40	40	1/7.41	1 mois 1/2	mi-novemb.	»	
	Reichenbach	168	1902-03		44	41	1/10	45 j.	12 mai	21 | 18	
	Illerbeuren	156	1903-04		59	57.16	1/5.82	30	2-3 novemb.	9	*Dyckerhoff et fils*
	Neckargartach	168	1903-05		40	40	1/8 à 1/10	28	10 novemb.	13 (moyenne)	Lauffen
	Wallstrasse	124	1904-05		65.45	57	1/9.83	63		7.4	Blaubeuren
	Wittelsbach	170	1904-05		44	41	1/10	49	30 mai	31	
	Moulins-lez-Metz	170	1904-05		44	44.70	1/8	50	29 juillet	7	
	Mannheim	172	1905-08		59.50	58.50	1/10.6	»	25 octobre	vte RG : 150 vte RD : 221	
	Kempten (pont à 4 vtes) (2 ponts jumeaux P_1, P_2)	112	1906	Arc peu surb.	63.80	50.60	1/5.52	42		Pont P_1 : 29 — P_2 : 3	*Dyckerhoff et fils*
	Elise	126	1906-07	Arc très surb.	47.50	43.50	1/9.89	»		24	
	Garching	92	1907-08	Anse de pan.	44.35	38.55	1/5.33	51	27 juin	15	Blaubeuren
	Gräveneck	210	1911-12	A. assez surb.	48	48.42	1/6.25	46	4 janvier	14	

Les mouvements des voûtes articulées devraient être plus grands que ceux des inarticulées. On ne le constate pas : l'effet des articulations est masqué par d'autres causes [33].

§ 3. — *CONTINUATION DU TASSEMENT APRÈS DÉCINTREMENT*

Le tassement continue pendant quelque temps après le décintrement, sans qu'on charge la voûte [34, 35], surtout celui des voûtes en briques qui ont beaucoup de joints [36].

33. — IV, p. 27.

34. — A l'arche rive droite du pont de Navilly, sur le Doubs, l'abaissement au décintrement (16 novembre 1785) fut de 103mm; dix heures plus tard, il était de 118mm et atteignit finalement 176mm.
De Dartein : « *Etude sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIXe siècle* », Volume IV, p. 186.

35. — Voir page 171, renvoi 14.

36. — Ouvrages en briques de la ligne de Castelsarrasin à Beaumont, — intrados en ellipse, — mortier de chaux :

	Portée	Montée	Tassement au décintrement	Augmentation au bout de : 1 jour	5 jours	12 jours
Viaduc de décharge des Calvets.....	27m	6m75	53mm	17mm	27mm	»
Pont de Belleperche	33m	8m25	90mm	29mm	»	39mm

Art. 1. — Voûte construite à pleine épaisseur. — Au décintrement, si la voûte est construite à pleine épaisseur sur cintre fixe, ses appuis (piles, culées,) recevront brusquement tout ce que portait le cintre ; leur compression et celle du sol s'ajouteront au tassement de la voûte : si le sol est compressible, les piles s'enfonceront, les culées s'enfonceront et reculeront [37].

Si elle est construite sur cintre retroussé, ses appuis auront tassé au fur et à mesure de la construction.

Art. 2. — Voûte construite par rouleaux. — Jusqu'à sa fermeture, le premier rouleau pèse, sur le sol si le cintre est fixe, sur les piles ou les culées, s'il est retroussé.

Le premier rouleau clavé reporte sur les appuis de la voûte une partie du poids du second.

Art. 3. — Dans le tassement total, faire la part des appuis. — On mesurera le tassement des appuis. Pour les voûtes sur cintres fixes des ouvrages fondés sur pilotis [38], il n'est pas du tout négligeable.

CHAPITRE V

ACCIDENTS AU DÉCINTREMENT : FISSURES, ÉCRASEMENTS

Il y a fissure aux reins, si on décintre trop tôt [39,40].

Si les joints du bandeau sont trop minces, — surtout si le queutage est en moellons bruts, — les voussoirs des reins se touchent par leur arête et éclatent [41].

C'est au décintrement que l'on constate la nécessité des voûtes homogènes [42].

37. — Au pont de la Coulouvrenière, les culées ont reculé au décintrement de 2^{mm} et 5^{mm}; après, de 4^{mm} et $1^{mm}5$ (IV, p. 84).

38. — Alma (I, p. 156, 157). — Boucicaut (III, p. 249) :

Pont de Saubusse. — Tassement, en *mm*, des piles fondées sur pilotis à têtes noyées dans du béton :

	1re pile (RD)	2e	3e	4e	5e	6e
amont	1^{mm}	10^{mm}	19^{mm}	2^{mm}	7^{mm}	5^{mm}
aval	2	8	8	7	5	8

Loc. cit., p. 173, renvoi 25, p. 654.

39. — Voir plus haut, p. 172, renvoi 15.

40. — Pont de Port-Sainte-Marie sur la Garonne (Ligne de Port-Sainte-Marie à Condom); 8 arches en ellipse : portée, 32^{m} ; montée, 10^{m} ; épaisseur à la clef : bandeau, $1^{m}20$; corps, $1^{m}35$.

A toutes les arches, et de chaque côté, fissure imperceptible à un joint voisin du milieu de la montée.

41. — On sait cela depuis longtemps. Au pont de Navilly, sur le Doubs, on observa des épaufrures aux reins de la voûte. Gauthey, dans une lettre du 22 octobre 1785, se plaint « *qu'on n'ait pas démaigri les arêtes en douelle des voussoirs inférieurs* ».

M. de Dartein. *Loc. cit. renvoi 34.*

42. — Voir plus haut, p. 16, art. 2.

COMMENT ON MESURE LES TASSEMENTS

On ne peut pas mesurer au niveau à bulle les très petits tassements des voûtes en ciment à clavages matés.

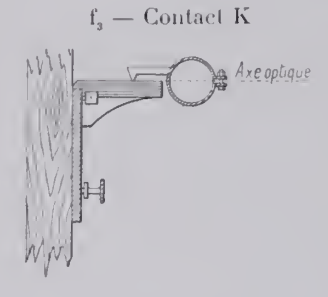
Au pont de Lavaur[43], on a opéré ainsi : dix-huit leviers au 1/20e étaient fixés sur chaque tête, aux angles de 0°, 10°, 23°, 43°, 53°, et douze autres à l'extrados des joints à 55° de la clef. (Les contacts se faisaient par des couteaux et étaient assurés par des poids ou des bandes de caoutchouc.)

Mesure des tassements

f_2 — Ensemble

En sept points de l'extrados de la voûte, sur l'axe, des lunettes plongeantes[44] étaient disposées comme l'indiquent f_2, f_3.

f_3 — Contact K



L'extrémité K était fixée au pont de service. Le centre O, c'est-à-dire la voûte, tassant de t = OO', on lisait sur la mire M ce tassement t multiplié par le rapport D : d (lequel à Lavaur variait de 500 à 700) ; d devant être très exactement apprécié, le contact K se faisait par deux couteaux reposant l'un sur l'autre à angle droit (celui de la lunette divisé en 0m0005), et était assuré par une forte bande de caoutchouc.

Ce procédé a été, ensuite, conseillé par M. Rabut. Je renvoie à l'excellent mémoire où il a indiqué les méthodes et décrit les instruments qui ont sauvé tant de ponts métalliques, injustement menacés[45].

43. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 476 à 478.

44. — Les leviers et lunettes étaient au droit des abouts des contrefiches du cintre, points correspondant aux plus grands tassements.

45. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1896, p. 374 : *Renseignements pratiques pour l'étude expérimentale des Ponts métalliques.*

ÉPREUVES DES VOÛTES EN MAÇONNERIE

Art. 1. — Voûtes inarticulées. — Les voûtes en maçonnerie travaillent, en général, fort loin de leur rupture : on n'utilise qu'une faible partie de leur résistance ; on ne leur a pas imposé d'épreuves et, en fait, on ne les éprouve pas[1].

C'est fort regrettable.

On devrait toujours observer l'effet des surcharges, non parce qu'il peut y avoir danger, mais pour s'instruire.

Si, cependant, l'effort se rapprochait de la charge d'écrasement, par exemple pour les ponts sous rails sous des machines plus lourdes, surtout pour les larges ponts-route en deux minces anneaux, il deviendrait nécessaire d'éprouver les voûtes, c'est-à-dire de mesurer, comme pour une travée métallique, ou un pont suspendu, leurs déformations, leurs vibrations.

Art. 2. — Voûtes articulées. — Celles-là, on les a quelquefois éprouvées[2]. Il est fort bon de le faire.

1. — On a éprouvé la voûte de Jaremcze (III, p. 117).

2. — Voir, Tome IV :
Voûtes semi-articulées : Höfen, p. 44 ; Morbegno, p. 72 ; Coulouvrenière, p. 85.
Voûtes articulées : Illerbeuren, p. 164 ; Mannheim, p. 208 ; Inzigkofen, p. 220 ; Neckarhausen, p. 237.

MOUVEMENTS ET FISSURES DUS AUX CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE

NÉCESSITÉ DE S'EN PRÉOCCUPER POUR LES GRANDES VOÛTES

JOINTS DE DILATATION

§ 1. — *VARIATION DE LONGUEUR D'UN PRISME :*

1° SOUS UNE COMPRESSION NORMALE β ($^{kg}/\overline{0^m01}^2$) ; — 2° POUR UNE VARIATION DE TEMPÉRATURE τ° ; — 3° PAR IMBIBITION

Art. 1. — Formules. — Considérons un prisme droit de longueur L (en mètres), de base Ω en $\overline{0^m01}^2$, pressée à son centre de gravité par une force normale N (en kg.).

Soient :

$$\frac{N \text{ (en kg)}}{\Omega \text{ (en } \overline{0^m01}^2)} = \beta_m \text{ (pression moyenne, en } {}^{kg}/\overline{0^m01}^2)$$

$$E \text{ (coefficient d'élasticité)} = \varepsilon \times 10^9 \, ({}^{kg}/1^{mq}) = \varepsilon \times 10^5 \, ({}^{kg}/\overline{0^m01}^2)$$

$$\alpha \text{ (coefficient de dilatation linéaire)} = \alpha' \times 10^{-6}$$

La variation en microns (μ) de la longueur du prisme est :

sous la pression β_m, si la déformation est proportionnelle à l'effort (hypothèse de Hooke) :

$$\Delta_\beta \text{ L (en } \mu) = \frac{10 \, \beta_m}{\varepsilon} \text{ L (en mètres;}$$

pour une variation de température τ° :

$$\Delta_\tau \text{ L (en } \mu) = \alpha' \, \tau^\circ \text{ L (en mètres).}$$

Il y faut ajouter l'allongement dû à l'imbibition ou le raccourcissement dû à la dessication.

Art. 2. — Quelques nombres.

Matériaux	Variation de longueur en μ par 1m de longueur					
	pour une compression de 1^{kg} $\overline{0^m01}^2$		pour une variation de température de 1° $\Delta\tau = \alpha'$ [1, 2]	pour une imbibition		
	pour $\varepsilon =$	$\Delta\beta = \frac{10}{\varepsilon}$		à saturation	au 1/10e	au 1/100e
Pierre	0,6 – 1 – 2	16 μ – 10 μ – 5 μ	»	»	»	»
Pierre de Vianne (Pont des Amidonniers)	5 (en moyenne)	2 μ	6 μ, 7 μ	80 μ à 120 μ (en moyenne 100 μ)	10 μ	1 μ
Mortier de ciment	»	»	11 μ, 14 μ	»	»	»
Béton de ciment	2	5 μ	14 μ	»	»	»
A titre de comparaison : Acier à ponts	*22 – 25*	*0, 1 μ*	*11 μ*	»	»	»
	A égalité de travail, l'acier se déforme de 5 à 40 fois moins que la pierre.					

1. — Pour L = 100m, α' = 8, τ = 20° : Δ L (en μ) = 8 × 20 × 100 = 16.000 μ = 16mm.
Ainsi un mur de 100m, pour un abaissement de 20°, se contracte de 16mm : la somme de ses fissures sera 16mm.

2. — On a trouvé pour α' :

7, 9 - granit, d'après la largeur des fissures du parapet du viaduc de Lapradelle (Quillan à Rivesaltes),

Annales des Ponts et Chaussées, 1905, 1er trimestre, p. 175 à 195 : « *Etude sur les effets de la dilatation dans les ouvrages d'art en maçonnerie, viaducs et barrages réservoirs* », M. Bonffet, Inspecteur général honoraire des Ponts et Chaussées ;

11, 8 - mortier de ciment à 1 p. 2 en volume,

4, 6 - maçonnerie de briques à mortier de ciment,

Annales des Ponts et Chaussées, 1863, 1er semestre, p. 178 : « *Expériences sur la dilatation des maçonneries* », M. Bouniceau, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées ;

3 à 4 — maçonnerie de briques à mortier de chaux,

Observations faites, sur ma demande, en 1910-11, sur le parapet du viaduc de Poix (Amiens Rouen), 12 arches de 16m50, par les soins de M. Rossignol, Ingénieur en chef de la Compagnie du Nord.

Art. 3. — Les changements de température raccourcissent un prisme plus que les charges usuelles. — Pour le calcaire de Vianne du pont des Amidonniers, la variation est la même :

$6\,\mu$ — pour une compression de 3^k, une variation de 1°, une imbibition de $6\,°/_o$;
$100\,\mu$ — pour une compression de 50^k, une variation de 17°, une imbibition à saturation.

Ainsi, les changements courants de température déforment les maçonneries autant, ou plus, que leurs charges et surcharges usuelles[3] : il s'en faut donc préoccuper dans les grandes voûtes.

Art. 4. — Compression, si on contrarie la dilatation. — Si on empêche la dilatation de $\alpha'\tau^o$ L correspondant à une élévation de température τ^o, on produit un effort de compression β_c[4], tel que : $\dfrac{10\,\beta_c\,L}{\varepsilon} = \alpha'\,\tau\,L$ d'où $\beta_c = \dfrac{\varepsilon\,\alpha'\,\tau}{10}$

Pour $\alpha' = 6$, et $\tau = 25^o$: $\beta_c = 15\,\varepsilon$ Pour $\varepsilon = 2$, $\beta_c = 30^k/\overline{0^m01}^2$; $\varepsilon = 5$, $\beta_c = 75^k/\overline{0^m01}^2$

§ 2. — *COMMENT VARIE LA TEMPÉRATURE DES VOUTES*

La température moyenne d'une voûte par 24^h est à peu près la même que celle de l'air[5] ; ses températures extrêmes s'en écartent moins[6] que celles de l'air.

§ 3. — *MOUVEMENTS OBSERVÉS AUX CLEFS DES VOUTES*

Sous l'action des variations de température, les voûtes sont toujours en mouvement : « elles ne dorment jamais » ; souvent leurs clefs (pour celles à ciment) s'abaissent autant et plus qu'au décintrement.

Ponts :	Voir Monographie Tome (III ou IV) page :	Matériaux du queutage	Portée $2a$	Montée b	Surbaissement	Tassement au décintrement	Variation h du niveau de la clef en *mm*	quand la température varie de	à	soit de τ
				VOUTES INARTICULÉES — Arcs surbaissés — Tome III						
Claix	39	MOV	52^m	8^m05	1/6.46	1 à 2^{mm}	7^{mm}	-7°	$+45^o$	52°
Teinach	203	PT Grès	33	3.30	1/10	43	1	»	»	2.5
Gour-Noir	108	PT Granit	60	16.10	1/3.73	1.3	11 à 15	hiver	été	»
Boucicaut	250	MAV Calc.	40	5	1/8	11 à 18	6 à 8	hiver rigoureux 1890-91		
Gutach	125	PT Grès	64	16.10	1/3.97	21	18	-12	$+22$	34
Schwändeholzdobel	128	PT Grès	57	14.25	1/4	21	17	-17	$+25$	42
Plauen	57	MOV Phylitte	90	18	1/5	82	75	été 1908	hiver 1909	»
Lusserat	158	MOV	45.70	9.87	1/4.63	3.2	6	-4	$+13$	17
				VOUTE SEMI-ARTICULÉE — Arc très surbaissé — Tome IV						
Morbegno	73	PT Granit	70	10	1/7	»	33	$+26$	-8	34

VOUTES ARTICULÉES — Arcs très surbaissés — Tome IV

Ponts	Tome page	Matériaux	Portée totale	Entre rotules: Portée $2a_r$	Montée b_r	Surbaissement	Tassement	en mm	de	à	soit de τ	Coefficient de dilatation α : $\alpha' = 10^{-6}\alpha = \dfrac{10^{-6}\,h}{\left(\dfrac{a_r^2}{b_r} + b_r\right)\tau}$
Grasdorf	137	Béton	40^m	40^m39	4^m52	1/8.9	24	12	-5	$+22$	27	4.7
Wallstrasse	150	Béton	65.45	57	5.80	1/9.83	7.4	48.5	-12	$+27$	39	8.5
Elise	153	Béton	47.50	43.50	4.40	1/9.9	24	15	-12	$+27$	39	3.4
Neckargartach	186	Béton	40	40	5	1/8	13	10	»	»	35	3.4
Neckarhausen	237	Béton	59.40	50	4.54	1/11	12.4	am^t 20 / av^t 29	3 juin	30 janv.	»	»

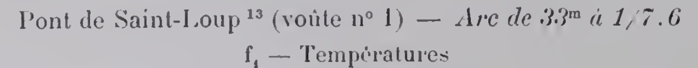
3. — A l'intrados des naissances du pont de Morbegno, la compression est : sous la surcharge, 11^k4 ; sous le poids mort, 22^k7 ; pour un refroidissement de 34°, 36^k (IV, p. 74).

4. — Dans des murs de revêtement faits en hiver, il y a eu en été des maçonneries écrasées ; les mortiers de chaux sont moins sensibles que ceux de ciment ; ceux de tuileau pilé le sont peu ; les briques le sont moins que le calcaire dur.
Annales des Travaux Publics de Belgique, avril 1912, M. Denil, Ingénieur principal des Ponts et Chaussées.

5. — Graphiques, f_1 à f_4, p. 182. 6. — Viaduc de Poix (Amiens-Rouen), 12 arches de 16^m50. — Températures extrêmes : de l'air, -4° à $+38^o$; du corps du parapet, -2^o5 à $+29^o$; du corps de la voûte, 0° à $+19^o$. 8. — Tome IV, p. 25.

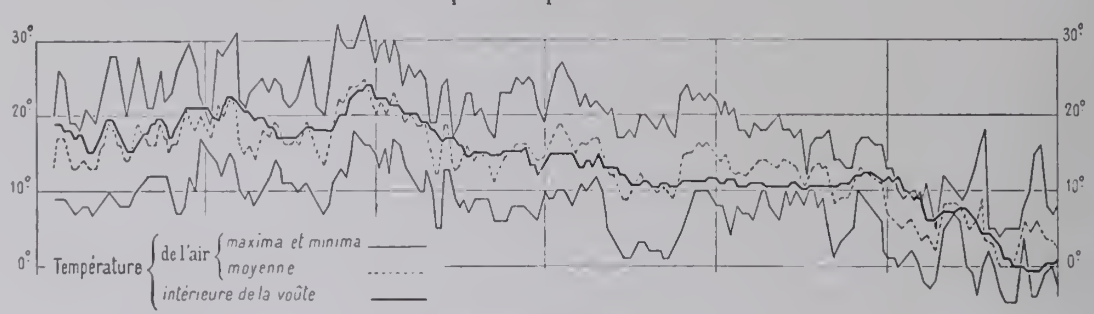
Si on trace deux courbes ayant pour abscisses les jours, pour ordonnées : l'une, le mouvement des clefs, l'autre, la température, elles se suivent assez exactement.

Je les ai données pour les ponts de Walnut Lane[9], Plauen[10], Morbegno[11], Elise[12]. Les voici pour deux autres ouvrages :

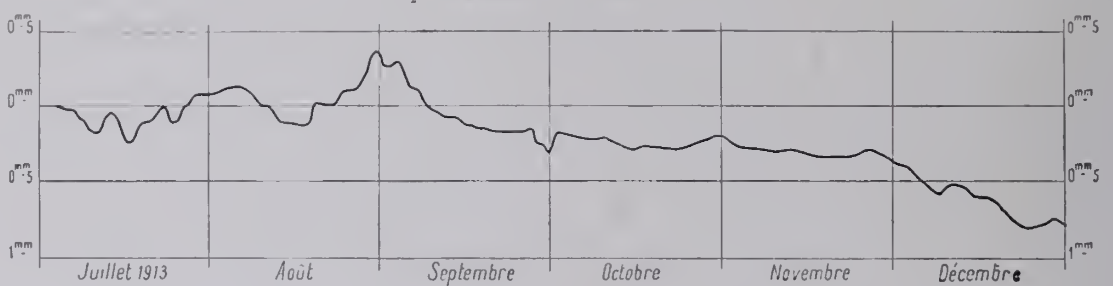


Pont de Saint-Loup[13] (voûte n° 1) — *Arc de 33ᵐ à 1/7.6*

f_1 — Températures

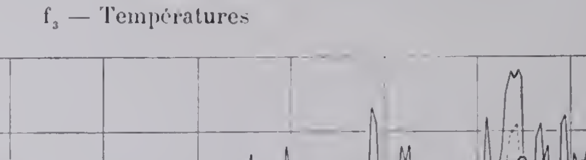


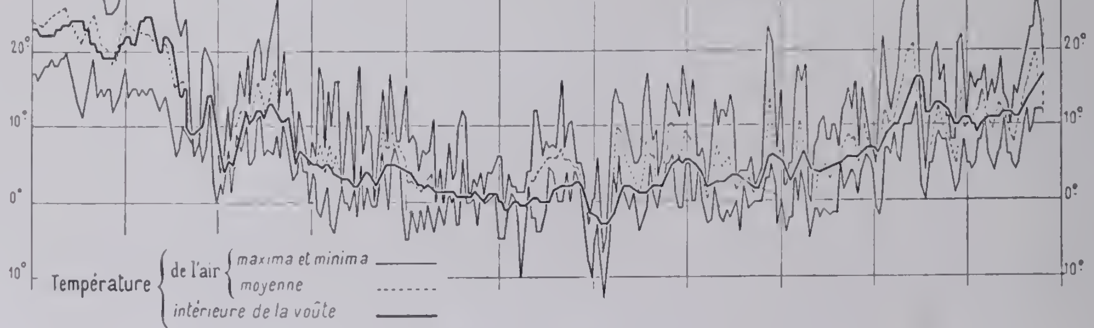
f_2 — Mouvements de la clef



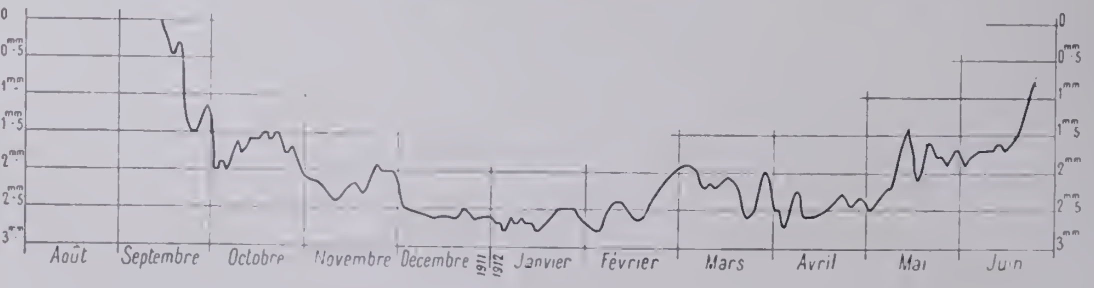
Viaduc de Morez[14] (voûte n° 1, côté Morez) — *Plein cintre de 20ᵐ*

f_3 — Températures





f_4 — Mouvements de la clef



9. — II, p. 93. 10. — III, p. 57. 11. — IV, p. 73. 12. — IV, p. 153.

13. — Sur l'Allier (Ligne de la Ferté-Hauterive à Gannat).

14. — Ligne de Morez à Saint-Claude.

§ 4. — *FISSURES D'HIVER*

Art. 1. — Effet du froid. — Le froid contracte les voûtes, en diminue la longueur, abaisse la clef de S en S' (f_5); AS se contracte, AOS tourne autour d'un point O voisin des retombées. Il y a fissure ou tendance à fissure le long de OA.

En été, la clef de la voûte monte, le tympan est soulevé par la voûte et, de plus, se dilate. Il y a compression le long de OA.

Art. 2. — Ouverture de joints aux reins des voûtes. — Pour les arcs tendus, le centre de rotation O est dans les joints même de retombée : ils s'ouvrent en hiver[15, 16].

Art. 3. — Fentes des tympans. — Le tympan se contracte par le froid et, de plus, suit la voûte qui s'abaisse : de là les fissures constatées :

dans les tympans pleins[17, 18, 19], spécialement le long de contreforts de piles[20], de murs en retour de culées[21] ;

dans les voûtes longitudinales d'élégissement : elles se coupent en un ou plusieurs points, mais normalement à leur axe[22, 23] ;

aux clefs des dernières voûtes transversales d'élégissement[21, 24] (point de moindre résistance), quelquefois le long de leur extrados[21].

15. — Pont sur l'Yonne, à Montereau (Ligne de Flamboin à Montereau), arcs de 24^m à 1/7,4; pont de Saint-Loup, sur l'Allier (Ligne de la Ferté-Hauterive à Gannat), arcs de 33^m à 1/7,5.

16. — Observations faites, sur ma demande, par M. Rétraint, Conducteur principal des Ponts et Chaussées.

	Pont d'Austerlitz				Pont des Invalides			
	Amont		Aval		Amont		Aval	
	R.D.	R.G.	R.D.	R.G.	R.D.	R.G.	R.D.	R.G.
Hiver, 3°	1^{mm}5	7^{mm}8	2^{mm}3	3^{mm}9	0^{mm}9	1^{mm}2	1^{mm}5	1^{mm}3
Été 20°	fissures refermées							
Été 26°7					fissures refermées			

17. — Boucicaut, III, p. 260. – Pont du Brézou ; arche de 29^{m}20 à 1/4, ligne de Limoges à Brive par Uzerche. (Annales des Ponts et Chaussées, 1892, 1er semestre, p. 545 à 596, Pl. 6 : « *Notice sur la construction du viaduc du Gour-Noir* », M. Draux.)

Pont d'Austerlitz et Petit Pont, à Paris. — Viaducs en plein cintre de : Pierre-Buffière (Limoges à Brive par Uzerche); de Pompadour, de la Sagne, de Vignols (Limoges à Brive par Pompadour); d'Albi (Castelnaudary à Carmaux); d'Auray (Savenay à Landerneau); de Mussy (Paray-le-Monial à Givors); de Saint-Sulpice (Montauban à Castres).

18. — Dans les ponts en arc, elles partent de l'extrados des retombées.

19. — Elles peuvent être dangereuses pour les ponts-canaux ; il n'y faut point de grandes arches plates.

20. — Viaduc de Pierre-Buffière (Limoges à Brive).

21. — Castelet, II, 130.

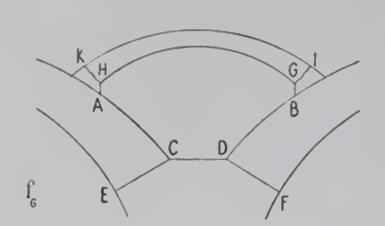
22. — Pont des Invalides (arcs : ouverture, 32^m; montée : 3^{m}10 pour les arches de rive, 4^{m}10 pour les arches intermédiaires), « les galeries longitudinales se disloquaient au droit des naissances et menaçaient de s'écrouler; on a dû les renforcer par un arceau inférieur en maçonnerie de briques doublant l'épaisseur de la voûte d'élégissement ».

M. Résal : « *Emplacements, Débouchés, Fondations, Ponts en maçonnerie* », Paris, Baudry, 1896, p. 266.

23. — On y a vu une supériorité des voûtes longitudinales sur les transversales.

24. — Gour-Noir (III, p. 108). — Constantine (II, p. 107, S_3, p. 509).

Art. 4. — Voûte unique d'élégissement jetée entre deux grandes voûtes[25].



— En hiver, B et A (f_6) des grandes voûtes tournent autour d'un point de DF et CE; la distance AB augmente. Pendant ce temps, la petite voûte se contracte : GH tend à diminuer. Donc, tendance à fissure le long de GI, de HK.

Voici ce qu'on a observé aux ellipses d'élégissement du pont des Amidonniers :

Avant la pose, — qui a un peu tardé, — de la dalle en béton armé, on y a vu des fissures de 1mm au plus d'épaisseur[26] :

en hiver : à l'intrados, à la clef; à l'extrados, aux reins;

en été, par les fortes chaleurs : à l'extrados, à la clef; à l'intrados, aux reins.

Les arêtes des joints ouverts sont demeurées intactes. Les voûtes se sont articulées.

Mais la dalle a chargé lourdement les voûtes; elle les a abritées du soleil : leur température et celle des grandes voûtes ne varient plus guère que de 5 à 6° dans la journée, au lieu de 24. On n'y a plus vu de fissures.

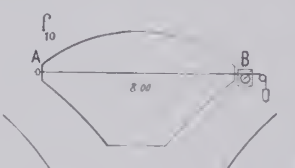
C'est pour l'aspect qu'on a adopté des ellipses plates au lieu de pleins cintres, de courbes surhaussées, qui souffrent moins d'un petit changement de portée.

Au viaduc de Morez (ligne de Morez à Saint-Claude), voûtes d'élégissement de 8m entre des pleins cintres de 20m, on a, pour un abaissement de température des grandes voûtes de 18° (22° le 9 septembre 1911, 4° le 7 octobre 1911), mesuré[27] un écartement des pieds-droits de 0mm34.

Quand l'aspect ne les impose pas, ces grandes voûtes d'élégissement ne sont pas à conseiller.

Art. 5. — Fentes des plinthes et des parapets.

— Il y en a en prolongement des fentes des tympans[28, 29], et ailleurs[30].



25. — Amidonniers (I, p. 193); Fontpédrouse (V, p. 87).

26. — IV, p. 281, renvoi 34.

27. — On a mesuré la variation de AB (f_{10}), au moyen d'un fil d'invar tendu entre A et B. En B était une crémaillère s'engrenant sur un pignon denté fixé à la maçonnerie. Les mouvements du pignon étaient amplifiés sur un cadran.

28. — Viaduc de La Pradelle, 1898-1900 (Ligne de Quillan à Rivesaltes), 12 arches en plein cintre de 12m, en courbe de 300m : fissures dans les tympans et le parapet, au droit des piles :

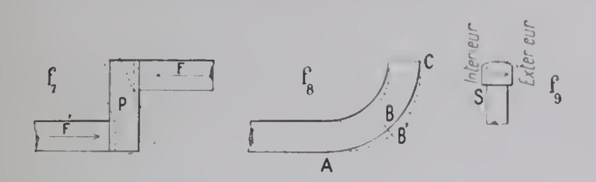
Dates 1902			Janvier		Février		Juillet	Décembre
			28	31	6	17		5
Température			+15°	−2°	+12°	−1°	+25°	−5°
Épaisseur en *mm* des fissures au dessus des piles n°	6 (côté concave)	Tympan	0mm5	0mm9	0mm7	0mm9	0mm2	1mm5
		Bahut	*0. 4*	*1. 2*	*0. 7*	*1. 3*	*0*	*1. 8*
	7 (côté convexe)	Tympan	0. 2	0. 6	0. 3	0. 8	0. 1	1. 4
		Bahut	*0. 8*	*2*	*1. 3*	*2. 4*	*0. 08*	*2. 7* maximum

29. — Pont sur l'Armançon (3 arches en ellipse de 25m à 1/4) : fissures partant de l'extrados et traversant les tympans. Fissures dans les plinthes de 2mm, à 5°.

30. — Viaduc de Bramefond (Ligne de Saint-Denis au Buisson), parapet en pierre tendre de Chancelade, scellé à la plinthe tous les 0m50 environ, exécuté en juillet et août : fissures à peu près tous les 20m.

Annales des Ponts et Chaussées, avril 1892 : « *Notice sur la construction du viaduc du Gour-Noir* », par M. Draux, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, p. 583.

Ces fissures, on ne peut pas les empêcher. On ne peut que les dissimuler pour un temps (par exemple par un coulis de ciment) : elles reparaissent à chaque hiver.



Aux angles du couronnement (refuges au-dessus des piles, ressaut des murs des culées), la pierre P (f_7) pivote en été sous les poussées FF' des bahuts dilatés [31, 32].

L'hiver suivant, ils se contractent : la fissure restée ouverte se remplit de poussières : l'été d'après, la rotation de P s'accentuera [33].

Dans des parapets en courbe, le bahut ABC (f_8), plus dilaté que le fût S (f_9), a été déplacé en AB'C (f_8) [34].

§. 3 — *DISPOSITIFS PERMETTANT LA DILATATION JOINTS DE DILATATION*

Art. 1. — Voûtes inarticulées et voûtes articulées. — Dans les voûtes articulées, les mouvements ne sont pas contrariés, et doivent être plus grands : aussi y a-t-on toujours ménagé le jeu de la dilatation.

Dans les voûtes inarticulées, on ne paraît s'en préoccuper que depuis quelque quinze ans [35].

Art. 2. — Les murs des tympans sont pleins. — On les coupe verticalement au-dessus des retombées [36, 37] en dissimulant, si possible, la coupure derrière un pilastre sur une pile, derrière le mur en retour d'une culée [38].

31. — Viaduc de Brabant (Ligne de Briey-Villerupt), parapet en briques, niches en pierre de taille sur les culées et les piles-culées, reliées à la plinthe par des goujons de fer scellés, construit dans l'hiver 1905-06 : aux premières chaleurs du printemps, des pierres des niches se sont séparées et quelquefois rompues ; déplacement maximum 8^{mm} ; le mortier des joints des couronnements des parapets a été remplacé, de distance en distance, par des feuilles de caoutchouc.

32. — Viaduc d'Anderny, parapets et niches établis à température moyenne : en hiver, nombreux joints ouverts.

33. — Pont de Tarbes sur l'Adour (3 arches de 18^m30, surbaissées au 1/7), 1877-1880 : mouvements dans les angles des bahuts des parapets ; fissures de 4^{cm} au cours de l'été, très chaud, de 1906.

34. — Pont de Tarbes. La saillie intérieure *s* (f_9) de 0^m02 a disparu : la saillie extérieure *s'* a atteint 4^c.

Les voûtes inscrites en *italiques* aux renvois 35 à 47 sont articulées.

35. — 1899-1900 : Gutach (III, 122) ; Schwändeholzdobel (III, 126).

36. — Plauen (III, 53), à 32^m50 de part et d'autre de la clef, retombée d'un cerveau de 65^m sur des culées en surplomb ; Ziegenhals (III, 208) ; Schwusen (III, 213) ; *Coulouvrenière* (IV, 81) ; *Garching* (IV, 95) ; *Kempten* (IV, 119) ; *Elise* (IV, 151) ; *Hochberg* (IV, 177) ; *Mannheim* (IV, 206).

37. — Au mur de garde du réservoir des Settons, on a, devant les joints de dilatation ménagés, disposé des lames de cuivre de 2^{mm}, ployées en leur milieu, boulonnées par leurs bords sur la maçonnerie.
Annales des Ponts et Chaussées, IV, juillet-août 1911, p. 204 : « *Note sur les joints de dilatation du mur de garde des Settons* », par M. P. Breuillé, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.
Dans des murs de soutènement en béton, à Chicago, de 1.875^m de long, on a ménagé des joints de dilatation fermés par du feutre.
Engineering Record, 27 janvier 1906.

38. — *Munderkingen* (IV, 57) ; *Malling* (IV, 175) ; *Cornélius* (IV, 180) ; *Reichenbach* (IV, 183) ; *Wittelsbach* (IV, 199).

Art. 3. — Les murs des tympans sont évidés par des voûtes. — La coupure verticale des tympans est alors :

soit entre la dernière demi-pile du viaduc d'élégissement et la pile ou la culée de la grande voûte [39] ;

soit au-dessus de la retombée extrême [40] ou de la naissance extrême [41] de la dernière voûte d'évidement ;

soit au-dessus de la clef de cette voûte [42] ;

soit à la fois au-dessus de sa clef et de ses retombées, parce qu'alors on l'a articulée en ces trois points [43].

On arme parfois :

soit l'ensemble des voûtes d'élégissement [44] ;

soit la dernière voûte seulement [45].

Art. 4. — La chaussée est portée par une plate-forme en béton armé sur murs ou colonnes en béton armé. — On coupe cette plate-forme :

soit seulement au-dessus des retombées [46] ;

soit, en outre, en d'autres points [47].

39. — Schalchgraben (II, 168) ; Rothweinbach (II, 172) ; Krenngraben (III, 135) ; Michelau (III, 209) ; Mehring (III, 253) ; Orléans (le premier grand ouvrage français où l'on ait assuré le jeu de la dilatation) (III, 258) ; Schweich (III, 268) ; *Göhren* (IV, 141) ; *Illerbeuren* (IV, 161) ; *Neckargartach* (IV, 186) ; *Moulins* (IV, 202).

40. — Palmgraben (II, 164) ; Gutach (III, 122) ; Steyrling (III, 137) ; Salcano (III, 148) ; Langenbrand (III, 152) ; *Maximilien* (IV, 192) ; *Max-Joseph* (IV, 242).

Aux ponts de Walnut Lane (II, 86) et de la Rocky River (II, 98), où les voûtes d'évidement sont en béton armé, il y a, aux retombées des voûtes d'élégissement, un joint de dilatation par voûte au premier pont, par deux voûtes au deuxième.

41. — Big Muddy River (I, 227) ; *Grasdorf* (IV, 131) ; *Inzigkofen* (IV, 227) ; *Neckarhausen* (IV, 235).

Au viaduc de la Sitter (Ligne du lac de Zurich au lac de Constance), le joint des tympans a été rempli de goudron ; à Krenngraben (III, 134), à Steyrling (III, 137), à Salcano (III, 143) de feutre asphalté ; à Rothweinbach (II, 171), d'asbeste.

42. — Schwändeholzdobel (III, p. 126).

43. — *Morbegno* (IV, p. 68).

44. — Connecticut (I, p. 69), il y a des joints de dilatation aux clefs des voûtes d'élégissement, de deux en deux ; Orléans (III, p. 258) ; *Illerbeuren* (IV, p. 161).

45. — *Grasdorf* (IV, p. 131) ; *Inzigkofen* (IV, p. 227) ; *Neckarhausen* (IV, p. 235).

46. — Guggersbach (III, p. 59) ; Longuich (III, p. 280) ; *Wallstrasse* (IV, p. 145).

47. — Edmondson (I, p. 124) ; Seythenex (III, p. 178) ; *Gräveneck* (IV, p. 215).

Au pont des Amidonniers (I, 199), la dalle en béton armé, non coupée, est posée sur des balanciers en béton armé.

LIVRE III

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS ?

GRANDES VOÛTES

CLASSEMENT PAR PAYS

PLUS GRANDE VOÛTE A CHAQUE ÉPOQUE

PROGRÈS

PART DE LA FRANCE

PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS ?

CHAPITRE I

QUELQUES GÉNÉRALITÉS

§ 1. — *PIERRE ET MÉTAL*

Le métal de nos ponts est un produit industriel ; la nature ne nous le donne pas : on ne l'y rencontre qu'oxydé.

Abandonné à lui-même, il retourne à l'état d'oxyde : il faut, continûment, l'en empêcher.

La pierre, nous l'employons telle que nous la trouvons. On en peut choisir qui ne craint pas les intempéries. Sa résistance aux efforts ne diminue pas avec le temps[1] : la pierre des Pyramides résiste, aujourd'hui, comme il y a 50 siècles.

Le liant des mortiers est, lui, un produit industriel ; mais le temps, qui rouille le métal, qui desserre les rivets, durcit le mortier.

Puisque l'acier est un produit fabriqué, il peut être amélioré ; la pierre, non.

Le métal travaille à tous les genres d'efforts : on l'emploie depuis peu ; chaque jour on lui prête des formes nouvelles.

Les voûtes ne travaillent qu'à la compression : on en fait depuis plus de 2.000 ans ; tout n'est pas trouvé, mais il y a moins à trouver.

§ 2. — *CAS OÙ S'IMPOSE LE MÉTAL*

Le pont en métal est mince, léger, se plie à toutes formes.

Il s'impose :

quand on n'a pas assez de revanche au-dessus des crues, des hautes eaux navigables, de la voie traversée ;

pour les ponts de ville entre quais, quand le débouché superficiel manque, même en exagérant le dos d'âne ou les rampes d'accès ; ou qu'il faut diminuer le remous et ne gêner ni la navigation, ni les crues, ni les courants de marée, ni la circulation sur les bas ports ;

quand le sol de fondation est mauvais, ou seulement douteux, que les appuis peuvent s'enfoncer ou reculer ;

quand il faudrait par trop dépasser ce qui a été fait :

comme portée[2], ou à la fois comme portée et surbaissement[2] ;

1. — La maçonnerie de briques s'améliore en vieillissant. Vitruve fait remarquer que, pour estimer la valeur d'un mur en moellons, on déduit du prix d'exécution 1/80e par an : « *De latericiis vero, dummodo ad perpendiculum sint stantes, nihil deducitur; sed, quanti fuerint olim facti, tanti esse semper æstimantur* » (Livre II, chapitre VIII).

2. — Voir plus loin, Titres II, III, IV.

comme hauteur, — ou à la fois comme hauteur et portée[3] ;

pour les ouvrages à travées très inégales, à plan compliqué, irrégulier ;

pour les très biais ;

quand il faut opérer vite ;

quand il n'y a pas de bons matériaux ou de bons ouvriers (colonies inhabitées....)

CHAPITRE II

COÛT TRÈS VARIABLE DE PREMIER ÉTABLISSEMENT

DES PONTS MÉTALLIQUES COMME DES PONTS VOÛTÉS

Quand les deux solutions sont possibles, laquelle est la moins chère ?

A une question aussi générale, il n'y a pas de réponse.

Le coût dépend d'un grand nombre d'éléments très variables : prix des matériaux qui change avec les lieux, avec le temps[4], — sol, profondeur, difficulté de fondation, — type d'ouvrage, sa largeur, sa longueur, — portée des arches ou travées, — aspect, — décoration, etc., etc....

3.

	Ligne	Date	Hauteur H	Ouverture de la plus grande arche $2a$	Somme $H+2a$	Sources
Aqued[e] de Roquefavour		1841-47	82m65	16m	98m65	Morandière, « *Construction des Ponts* », p. 390.
Viaducs de Gœltzschthal	Leipzig-Hof	1846-51	80.34	30.875	111.215	Annales des Ponts et Chaussées, mai-juin 1853, p. 241. *Chemins de fer saxons.* M. de Villiers.
Viaducs de Elsterthal	Leipzig-Hof	1846-51	69.68	30.59	100.27	Annales des Ponts et Chaussées, mai-juin 1853, p. 241. *Chemins de fer saxons.* M. de Villiers.
Viaducs de l'Altier	Brioude-Alais	1867-69	73.33	16	89.33	Exposition, Paris, 1878, Notice Travaux publics, p. 352
Viaducs de la Crueize	Marvejols-Neussargues	1879-83	63.30	25	88.30	Ecole des Ponts et Chaussées. Dessins distribués aux Elèves, T. III, 4e fascicule, p. 485.
Viaducs de Mussy	La Clayette-Lamure (*Paray le Monial-Givors*)	1892-95	60	25	85	Annales des Ponts et Chaussées, 1901, I, p. 235. *Viaduc de Mussy.* M. Pouthier.
Viaducs de Weissenbach	Saint-Gall-Wattwil	1907-09	61.40	25	87.70	Denkschrift über die Eisenbahnverbindung Romanshorn-St Gallen-Wattwil-Uznach. Pl. 8.

Dans son *Cours de Chemins de fer*, 1868-69, p. 360, 361, Pl. 19, Bazaine décrit un aqueduc à Spolète, sans doute d'après Gauthey ; l'ouvrage existant a 76m85 de hauteur au lieu de 131m, des arches en ogive de 5 à 9m et non de 21m, a beaucoup plus de pleins que de vides et présente l'aspect lourd et massif d'un mur à arcades, au lieu de l'effrayante légereté du dessin de Gauthey. Enfin, il n'a pas été construit en 741 par Théodoric, lequel est mort en 526, mais par la commune de Spolète, entre 1239 et 1278. Lire à ce sujet une très intéressante brochure de M. Clericetti, professeur à l'Ecole des Ingénieurs de Milan (Milan, 1884).

4. — Ponts en acier construits par la Cie P.-L.-M depuis 1886 : 23.599 tonnes ; prix moyen annuel du kilog : 38c25 (1896) — 50c70 (1900) — 32c15 (1904) — 52c97 (1908) — 55c58 (1913) ; minimum, 31c30 (1904) ; maximum, 59c50 (1909).

Si, pour un grand nombre de ponts métalliques ou de ponts voûtés, on relève le prix p du m.q. de surface offerte à la circulation, on trouve pour les deux des écarts énormes[5, 6].

Des moyennes ne signifient rien, c'est affaire d'espèce. Il faut, dans chaque cas, comparer le moins cher des ponts en métal au moins cher des ponts voûtés, l'un et l'autre évalués sans parti pris.

5. — **Ponts en maçonnerie.** — A 26 ponts vicinaux de l'Ardèche, construits avec la plus stricte économie, — fondations faciles, matériaux à pied-d'œuvre, — p a varié de 34^{f} à 265^{f}, moyenne 105^{f}50.

Pour de grands ponts à fondations faciles, il faut déjà doubler :

Ponts de Bléré, sur le Cher (1898-99), 208^{f} ; des Andelys (1872-73), 222^{f}.

Si les fondations sont chères, le prix s'élève : Pont de Mareuil, sur la Dordogne (1891), ligne de Cahors à Brive, 348^{f} ; ponts sur la Garonne (chemin de fer à une voie) : Belleperche (1895-1900), 312^{f} ; Port-Sainte-Marie (1874-77), 612^{f} ; Marmande (1881-85), 695^{f}.

Voici, classés d'après leur prix, 71 ponts à voûtes de 40^{m} et plus, construits depuis 1875 ;

p	Voûtes inarticulées		*Ponts en 2 anneaux* Voir Tome V, p. 71		Voûtes articulées *(Tome IV)*	
		Nombre de ponts		Nombre de ponts		Nombre de ponts
moins de 200^{f}	Huzenbach, 1889, III, p. 193 ; Longuich, 1909-10, III, 237 ; Schweich, 1905-06, III, 235 ; Michelau, 1905-06, III, 195 ; Guggersbach, 1906. III, 15 ; Mehring, 1903-04, III, 231 ; Lichtensteig, 1907-09, III, 89 ; Brent. 1899-1900, I, 13 ; Solis, 1901-02, I, 53 ; Teinach, 1882, III, 193.	10			Baiersbronn, 1889, p. 39 ; Marbach, 1886-87, 39 ; Munderkingen, 1893, 53 ; Neckargartach, 1903-05, 169 ; Inzigkofen, 1895, 221 ; Göhren, 1903-04. 125 ; Grävenèck, 1911-12, 211.	7
de 200^{f} à 300^{f}	Trittenheim, 1907-08, III, 235 ; Verdun-s.-Doubs, 1895-97, I, 111 ; Bellefield, 1896-97, III, 15 ; Plauen, 1903-05, III, 15 ; Boucicaut, 1888-90, III, 231, Saulnier, 1882, III, 13 ; Cinuskel, 1910-12, II, 179 ; Wäldlitobel, 1883-84, II, 121 ; Seythenex, 1908-11, III, 171 ; Pouch, 1890, III, 83 ; Krummenau, 1910-11, III, 91.	11	Amidonniers, 1903-11, I, 189.	1	Wallstrasse, 1901-05, 125 ; Höfen, 1885, 39 ; Moulins-lez-Metz, 1904-05, 171 ; Illerbeuren, 1903-04, 157 ; Reichenbach, 1902-03, 169 ; Neckarhausen, 1899-1900, 222 ; Hochberg, 1901-03, 167 ; Grasdorf, 1899-1900, 125 ; Elise, 1906-07, 127 ; Cornelius, 1902-03, 167.	10
de 300^{f} à 400^{f}	Calcio, 1877-78, III, 81 ; Bellows-Falls, 1899, III, 223 ; Escot, 1907-09, II, 123 ; Freyssinet, 1890-91, III, 83 ; Gravona, 1881, II, 179 ; Ramounails, 1906-08, II, 179 ; Rebuzo, 1898-1900, I, 39 ; Avignon, 1905-09, III, 235 ; Gour-Noir, 1888-89, III, 81 ; Svenkerud, 1905-07, III, 87 ; Saint-Pierre, 1886, I, 91.	11			Wittelsbach, 1901-05, 171 ; Kempten, 1906, 113.	2
de 400^{f} à 500^{f}	Big Muddy River, 1901-03, I, 223 ; Langenbrand, 1907-09, III, 89 ; Canale, 1901-06, III, 183 ; Strandeelven, 1902-03, III, 85 ; Orléans, 1904-06, III, 233 ; Valence, 1901-05, I, 143.	6	Luxembourg, 1899-1903, II, 61.	1	Prince-Régent, 1900-01, 223 ; Maximilien, 1901-05, 169 ; Max-Joseph, 1901-02, 223 ; Garching, 1907-08, 93.	4
de 500^{f} à 600^{f}	Wheeling, 1891-92, III, 13 ; Schwändeholzdobel, 1899-1900, III, 85 ; Wiesen, 1907-09, I, 233 ; Montanges, 1908-09, III, 17 ; Schalchgraben, 1901-05, II, 121 ; Oloron, 1881-82, I, 39 ; Lusserat, 1908-10, III, 89 ; Antoinette, 1883-84, II, 117 ; Castelet, 1882-83, II, 117 ; Gutach, 1899-1900, III, 85 ; Palmgraben, 1904-05, II, 121.	11				
de 600^{f} à 700^{f}	Verdon, 1905-06, I, 129 ; Mantes, 1873-75, I, 141.	2	Walnut-Lane, 1906-08, II, 63. Sidi-Racbed, 1908-12, II, 65.	2	Morbegno, 1902-03, 63.	1
de 700^{f} à 800^{f}	Washington, 1899-1900, I, 61 ; Empereur-François, 1898-1901, I, 111.	2				
de 800^{f} à 900^{f}	Céret, 1883-85, II, 121 ; Lavaur, 1882-84, II, 119.	2				
1.173^{f}	Steyrling, 1904-05, III, 87.	1				
1.598^{f}	Salcano, 1904-06, III, 87.	1				

6. — **Ponts en métal** (métal, maçonneries, fondations) :

Poutres droites sous chemin de fer (deux voies) : Cosne (Bourges à Cosne, 1892), 315^{f} ; Melun, sur la Seine (Corbeil à Montereau, 1895), 466^{f} ; Montereau, sur la Seine (Corbeil à Montereau, 1896), 562^{f} ; Avignon (raccordement des deux lignes rive droite et rive gauche du Rhône, 1902), 602^{f} ; Peseux, sur le Doubs (Saint-Jean-de-Losne à Lons-le-Saulnier, 1903), 635^{f} ; Caronte (Miramas-L'Estaque, 1909), travées de 82^{m}50, 1.298^{f}.

Ponts de grande ville (grands arcs d'acier sous chaussée) : Ponts sur le Rhône, à Lyon : Université, 1903, 141^{f} ; La Fayette, 1888-90, 623^{f} ; Morand, 1888-90. 678^{f} ; Pont Mirabeau, à Paris, 1893-95, 591^{f} ; Pont de Rouen, 1881-88, 889^{f} ; Pont Alexandre III, à Paris, 1897-1900, 1.120^{f}.

SUPÉRIORITÉ DES PONTS EN MAÇONNERIE
AU POINT DE VUE DE L'ENTRETIEN PROPREMENT DIT

§ 1. — *ENTRETIEN DES PONTS MÉTALLIQUES*

Art. 1. — Entretien proprement dit. — On visite chaque année[7] les ponts métalliques ; on remplace les rivets desserrés, les bois fatigués du platelage. On les repeint pour les préserver de la rouille (une couche de peinture en moyenne tous les 5 ans). On vérifie, tous les 5 ans, leurs flèches permanentes[7].

Pour les ponts de chemins de fer, cet entretien est fait par les Services de Voie. Mais les Villes, les Départements et les Communes n'ont pas de service organisé et souvent peu de ressources : pour eux, c'est un motif spécial à ne pas faire de ponts métalliques.

Art. 2. — Influence du type de poutre sur le nombre de rivets à remplacer. — Des ponts légers, à petits éléments, à treillis mince, « ferraillent » au passage des trains.

On y a surtout à refaire les rivets qui attachent les longerons aux entretoises[8].

On n'a guère qu'à repeindre les ponts à poutre pleine[9], ceux à gros éléments[10], les très grands que le passage des trains impressionne peu[11], ceux qui sont très bien rivés[12].

Art. 3. — Causes spéciales de détérioration. — L'air salin au bord de la mer[13], les fumées des machines attaquent le métal[14].

7. — La circulaire du Ministre des Travaux publics n° 5 du 29 août 1891 impose :
une visite annuelle « *portant principalement sur l'état de la rivure* »;
une fois tous les 5 ans « *une inspection détaillée et une vérification des flèches permanentes* ».
La circulaire du Ministre de l'Intérieur du 21 mai 1892 prescrit ces visites et épreuves pour les ponts métalliques dépendant des chemins vicinaux.

8. — Depuis leur mise en service jusqu'en 1901, on a remplacé 263 % de ces rivets au viaduc de la Bouble.

N° Renvoi	Ponts :	Rivières traversées	Période	Soit pendant	Dépenses par an		Observations
					par tonne de métal	par m.q. de plan	
9	de Langon	Garonne	1892 VII-1911 VIII	19 ans	3f 47	1f 71	Garabit a coûté 3.315.000f. L'entretien annuel a été de 1.650f, soit à 1 % un capital de 116.000f ne représentant qu'un accroissement de 3,1 % des dépenses de construction.
9	de Moissac	Tarn	1893 I-1902 XII	10 ans	3.30	1.45	
10	de Bordeaux	Garonne	1893 III-1902 IX	9 1/2	1.80	1.17	
11	de Garabit	Truyère	1888-1902	14 ans	1.10	2.31	
11	du Viaur	Viaur	1903 I-1911 XII	9 ans	1.00	0.63	

12. — Pour les ouvrages bien faits, bien rivés, l'entretien est insignifiant. Ex. : ces 3 ponts à 2 voies, à poutres droites, en acier, à travées solidaires :

Pont de :	Ligne de :	Longueur du tablier	Période			Dépense			
			de	à	Durée	totale de la période	moyenne par an		
							pour l'ouvrage	pf m.q. en plan	par tonne
Melun, sur la Seine	Corbeil-Montereau	115m	1897	1910	13 ans 8 mois	521f 72	10f 36	0f 035	0f 045
Avignon, sur le Rhône	Raccordement des lignes de rive droite et de rive gauche du Rhône	553	1905	1910	5 ans	5.910.36	1.188.07	0.26	0.30
Peseux, sur le Doubs	St-Jean de Losne Lons-le-Saulnier	148.27	1905	1911	6 ans 5 mois	560	87.27	0.0074	0.10

13 — Genio Civile, septembre 1903.

14. — Aux passages supérieurs métalliques de la ligne de Paris à Auteuil, les parties inférieures des poutres rongées par la fumée, n'avaient plus de résistance; le moment d'inertie des poutres était réduit au 1/4 ou au 1/5 de sa valeur.
Revue Générale des Chemins de fer, 5 novembre 1901, M. Rabut : « *Conférence sur l'expérimentation des ponts* ».

Art. 4. — Capital à ajouter au coût de l'ouvrage pour tenir compte des frais d'entretien proprement dit. — Il serait fort intéressant, mais il est difficile, de faire la part de la dépense de consolidation due à l'augmentation des surcharges, et celle de l'entretien proprement dit.

J'essayerai seulement d'indiquer « l'ordre » des frais d'entretien :

	Est	Midi		Orléans		P.-L.-M.
Dates des relevés..	1902	1902	1912	1902	1912	1911
Ouvrages — Longueur	767m 344	1.570m 21	3.635m 80	3.784m 40	6.859m 72	2.792m 58
Ouvrages — Poids	2.525T	6.875T	12.142T	16.519T	22.301T	12.023T
Dépense moyenne d'entretien par an — pendant une période de	6 à 46 ans	2 à 35 ans	5 à 10 ans	7 à 23 ans	5 à 10 ans	5 à 51 ans
totale	8.089f 44	14.700f 54	25.818f 99	33.917f 66	31.759f 00	16.008f 86
par m. q. en plan [15]...	1f 46	1f 21	1f 00	1f 56	0f 89	0f 84
par tonne	3f 20	2f 13	2f 12	2f 05	1f 42	1f 33
Correspondant à un capital d'entretien (à 4 %) — par m. q., de..	36f 50	30f 25	25f 00	39f 00	22f 25	21f 50
par tonne, de..	80f 00	53f 25	53f 00	51f 25	35f 50	33f 25
Rapport du capital d'entretien au coût du tablier métallique compté au prix moyen de 500f la tonne..	16/100	10.6/100	10.6/100	10.2/100	7.1/100	6.7/100
En gros, dans les grands ponts à poutres droites, le métal représente souvent les 70 % de la dépense : pour eux, le rapport du capital d'entretien au prix total de construction s'abaisse à	11/100	7.4/100	7.4/100	7.1/100	4.9/100	4.7/100

Pour des ouvrages bien conçus, le capital représentant l'entretien proprement dit est probablement inférieur à 10 % des dépenses totales de construction.

§ 2. — *ENTRETIEN DES PONTS VOÛTÉS*

Art. 1. — Entretien proprement dit. — Aux ponts en maçonnerie, on a eu à refaire des joints (ce qui peut se faire sans gêner la circulation), à remplacer des pierres gelées, pourries ; surtout, — c'est souvent la grosse dépense, — à refaire en asphalte d'anciennes chapes en ciment ou en béton [16].

15. — M. de Boulongne, Ingénieur en chef de la Voie de la Cie P.-L.-M., évalue l'entretien normal par m. q. et par an, de 0f45 à 0f80 pour les ouvrages avec platelage métallique, soit, en capital à 4 %, de 11f25 à 20f. Pour des ouvrages coûtant 500f le m. q., ce n'est que 2,5 % à 4 % des dépenses de construction.

16. — Dépenses d'entretien d'ouvrages en maçonnerie sous rails :

	Est	Etat	Midi		Orléans				P.-L.-M.	
Relevés faits en	1902	1902	1912		1902		1912		1912	
	2 voies	1 voie	1 voie	2 voies	1 voie	2 voies	1 voie	2 voies	1 voie	2 voies
Nombre d'ouvrages	31	13	23	16	47	39	69	77	11	22
Nombre d'arches	161	39	57	26	329	426	373	620	139	333
Longueur	3.615m	785m	1.281m	371m	7.313m	7.231m	3.313m	10.411m	2.023m	3.936m
Cube de maçonnerie (m.c.)	183.582	29.731	51.231	14.355	323.873	400.895	388.194	677.900	72.371	167.402
Dépense moyenne d'entretien par an — pendant une période de	5 à 18 ans	9 à 21	5 à 17	9 à 17	4 à 13	6 à 43	5 à 10 ans		10 à 40	11 à 62
totale	15.375f 15	88f 81	863f 05	391f 23	7.026f 29	9.234f 52	5.838f 32	3.930f 65	6.959f 40	6.208f 56
par m.c. de maçonnerie	0f 083	0f 0029	0f 017	0f 027	0f 021	0f 023	0f 015	0f 006	0f 096	0f 037
par m.q. en élévation	0f 32	0f 0069	0f 051	0f 093	0f 049	0f 09	0f 011	0f 02	0f 186	0f 137
par m.q. en plan	0f 15	0f 017	0f 097	0f 132	0f 18	0f 14	0f 14	0f 04	0f 667	0f 191

A la plupart des ouvrages, qui ont aujourd'hui plus de 40 ans, la chape était mauvaise : l'eau a traversé les maçonneries, dissous et entraîné la chaux du mortier, attaqué les matériaux sensibles à l'humidité (briques mal cuites, grès poreux, certains tufs,....). Après n'avoir rien coûté pendant longtemps, des ponts en maçonnerie ont tout à coup demandé une grosse réparation, qui a été de refaire entièrement[17] la chape, — réfection qui, en cours d'exploitation, a coûté jusqu'à 5 et 6 fois le prix d'une chape neuve.

Sur les ouvrages bien faits, il n'y a à peu près rien à dépenser.

En 10 ans, on a dépensé 707ᶠ pour entretenir 7 grands ouvrages construits par Morandière et son élève M. Dupuy, ouvrages qui ont coûté 6.754.398ᶠ et cubent 105.853ᵐᶜ [18].

Au pont de Montlouis, de 1844, long de 378ᵐ, on a, en 10 ans, dépensé 6ᶠ — un sou par mois.

CHAPITRE IV

SUPÉRIORITÉ DES PONTS VOÛTÉS

POUR RÉSISTER A DES MACHINES PLUS LOURDES

§ 1. — *IL FAUT CONSOLIDER OU REFAIRE LES PONTS MÉTALLIQUES*

La grosse dépense des ponts métalliques de chemin de fer, ce n'est pas l'entretien proprement dit des tabliers ne supportant que les surcharges pour lesquelles ils ont été calculés, — c'est que, s'ils doivent laisser passer des machines plus lourdes, il faut les consolider, souvent les remplacer.

17. — On réussit mal à ne refaire qu'une partie de la chape : il n'en coûte guère plus de la refaire toute.

18.

	Dates d'exé-cution	Longueur	Hauteur	Arches		Cube de maçonnerie	Dépenses					
				Nombre	Portée		de construc-tion	d'entretien				
								pendant	totale	par an		
										totale	par m. q. en plan	par m. c. de maçon-nerie
									(en francs)		(en millimes)	
Pont de Montlouis, sur la Loire. *(Orléans à Tours)*	1843-44	378ᵐ60	11ᵐ30	12	21ᵐ75	19.598ᵐᶜ	1.620.398ᶠ	10 ans 1892-1902	6ᶠ	0ᶠ60	0ᵐᵐ2	0ᵐᵐ03
Viaduc de Pompadour........... *(Nexon à Brive)*	1873-75	285	55	8	25	18.120	1.200.000	12 ans 1888-1900	59.30	4.94	1	0.2
Ensemble, les 4 ponts de Mauzac, Trémolat, Alles, Limeuil ...... *(Bergerac au Buisson)*	1876-78	890.31	12.10 11.40	7 21	30 24	21.461	1.721.000	10 ans 1893-1903	535.37	53.54	7.5	2.2
Viaduc du Blanc, sur la Creuse *(Poitiers au Blanc)*	1883-86	528	38.11	21	20	13.371	2.213.000	10 ans 1892-1902	106.48	10.65	1	0.2
Totaux et moyennes.....		2.081ᵐ91		69	20 à 30ᵐ	105.853ᵐᶜ	6.754.398ᶠ		707ᶠ15	69ᶠ73	5.1	0.66

Or, le poids des essieux augmente continûment et très vite [19]; il faut donc, continûment, soit consolider les ponts métalliques si on le peut [20, 21], soit les refaire [22], et souvent après peu d'années.

On fait travailler l'acier, sous les trains actuels, au 1/4 de sa rupture : si on calculait les tabliers pour les plus lourdes machines de l'avenir, il y faudrait beaucoup plus d'acier, et ils seraient tout de suite bien plus chers que les ponts voûtés.

Pour les ponts sous chaussée [23] et sous voie étroite, les surcharges ont peu augmenté.

§ 2. — *LES PONTS EN MAÇONNERIE RÉSISTENT*

Quelques petits ouvrages, — surtout de petits arcs surbaissés, — ont été disloqués parce que le matelas de remblai et de ballast était trop mince.

On a quelquefois refait des murs de tympans ébranlés par les nouvelles machines plus lourdes.

Mais les grands ouvrages en maçonnerie ont pu porter sans fatigue les lourdes et vites « Pacific » ; leur capacité de résistance n'était pas épuisée.

Le pont en maçonnerie travaille surtout au poids mort ; il a de la masse : « *mole suâ stat* ». Les surcharges ne l'impressionnent pas ; on peut impunément les augmenter : elles demeurent fort au-dessous de celles qu'il peut porter.

19. — Augmentation du poids des machines et de leurs tenders :

	Dates des circulaires, normes, etc.	Essieux des machines — Nombre	Pour le plus lourd — Poids	Augmentation — totale	Augmentation — °/₀	Machines avec leurs tenders — Poids total	Longueur	Poids de la machine par m. c^{t}	Augmentation de poids — totale	pour un nombre d'années de :	par an — totale	par an — °/₀	Sources
France (Cie P.-L.-M.)	1891	4	14^{T}	1^{T}5	32	80^{T}	15^{m}30	5.229^{k}	1.502^{k}	10 ans	150^{k}	2.9	Circulaire ministérielle du 29 août 1891.
	1911	6	18.5			157.3	23.37	6.731					Machine « Pacific ».
Amérique (Missouri-Pacific)	1888	5	12.138	12.81	105.5	81	17.605	4.771	3.907	20 ans	195	4.1	Bulletin de l'Association du Congrès international des Chemins de fer. Berne 1910. — N° 1. M. Byers, Ingénieur en chef du « Missouri-Pacific Ry ».
	1908	5	21.918			180.1	20.753	8.678					
Russie	1896	4 de	15	5	33.3	97.5	16.10	6.056	2.858	11 ans	260	1.3	N° 15, p. 117 à 150. M. Belébusky.
	1907	5 de	20			156	17.50	8.911					
Italie...........	1897	1	15	2	13.3	90	15.65	5.750	1.466	12 ans	122	2.1	N° 22, p. 198.
	1909	5	17			127	17.60	7.216					

20. — De 1892 à 1909, les Chemins de fer de l'État hongrois ont renforcé des ponts métalliques d'une longueur totale de 16.730^{m} ; parmi les plus importants, 26 ouvrages comportant 80 travées de 26^{m} à 53^{m}298, d'une longueur totale de 3.797^{m}05, construits de 1863 à 1898, renforcés de 1897 à 1909. (Bulletin de l'Association du Congrès international des Chemins de fer, Berne 1910, 1er fascicule, volume XXIV, n° 6, p. 2063 à 2136, — M. Maurer, Inspecteur principal des Chemins de fer de l'État autrichien.)

21. — Le viaduc du Credo, sur le Rhône (ligne de Bellegarde à Saint-Gingolph), construit en 1878, a été renforcé en 1912-13 (dépense : 152.300^{f}). Le pont de Saint-Germain-des-Fossés, sur l'Allier (ligne de Saint-Germain-des-Fossés à Clermont), construit en 1858, a été renforcé en 1912 (dépense : 357.100^{f}).

22. — Viaduc de la Vézeronce (ligne de Lyon à Genève), construit en 1855-58, reconstruit en 1912-13 (dépense : 315.000^{f}).

23. — Les deux circulaires des 15 juin 1869 et 29 août 1891 prévoient les mêmes surcharges : véhicules de 11^{T} à 2 roues, de 16^{T} à 4 roues. — surcharges de 400^{k} par m.q. sur les trottoirs.

CHAPITRE V

AVANTAGES SPÉCIAUX DES PONTS VOÛTÉS

§ 1. — *ILS SONT PLUS BEAUX*

Les poutres droites, les poutres à semelle supérieure courbe, en poisson, en ventre de poisson, — les croissants de lune de Porto, de Garabit, — les ponts où l'on a réalisé, en métal la courbe des moments de flexion (quelques-uns de ceux-là sont hideux), — tout cela ne sert qu'à passer l'eau : l'aspect n'en importe pas plus que d'un pont de service ou d'un bac.

On a beau décorer un pont métallique, ce n'est qu'un outil, un instrument, un échafaudage : c'est grêle, c'est menu, cela sent le provisoire.

Un grand pont métallique peut être une solution élégante, un beau travail d'Ingénieur, étonner par sa portée, sa hauteur, son surbaissement, par la difficulté vaincue. S'étonner n'est pas admirer.

Ce qu'il y a encore de mieux dans les beaux ponts métalliques, c'est leur maçonnerie, et si l'on accepte les grands arcs de fonte ou d'acier, c'est qu'ils commencent à ressembler à des voûtes [24].

Le pont en maçonnerie, lui, peut être plus qu'utile : il peut valoir, non seulement par son objet, mais par lui-même, ses lignes, ses formes ; être beau, bien que petit ; — être grand sans être énorme.

La décoration y peut faire partie de l'ouvrage, n'y pas être rapportée, plaquée.

Il peut s'ajuster aux lieux ; — n'y point sembler étranger, importé. On peut jeter sur une gorge sauvage [25] un arc à pierres grossières, qui en fasse comme partie : on peut faire à Toulouse un pont toulousain.

§ 2. — *ILS SONT PLUS SOLIDES*

Jamais un pont voûté n'a été écrasé sous un train [26], crevé par un train déraillé [27], renversé par le vent [28].

Ils résistent aux chocs des bateaux, des arbres emportés par une crue, ils ne sont pas rongés par la fumée des trains ou des bateaux.

§ 3. — *ILS DURENT*

La passerelle en fonte des Arts a 112 ans ; le pont suspendu sur le détroit de Menai, 89 ans.

24. — On les fera pleins. — Ceux du pont de l'Université, à Lyon, sont à jours, il est permis de le regretter.

25. — Il est quelquefois demandé — non sans raison — par les Syndicats de défense des paysages.

26. — 14 juin 1891. Pont de Mœnchenstein, près de Bâle. Travée de 42^m.

27. — 4 avril 1907. Pont de Cé. (Génie Civil, 14 septembre 1907, p. 320.)

28. — 27 décembre 1879. Pont de la Tay. (Annales des Ponts et Chaussées, mai et novembre 1880. — Morandière, Tome 2, p. 750 et suivantes,)

Mais les ponts de Trajan ont 18 siècles, ceux d'Auguste 19; mais le Parthénon a 24 siècles, les Temples de Thèbes 34 et 37, les Pyramides 54.

Pour le fer, on compte encore par année; pour la pierre, par siècle.

On peut croire impérissable un pont en maçonnerie bien fondé, en bons matériaux, avec une bonne chape bien protégée.

§ 4. — *ILS SONT PLUS SIMPLES DE PROJET ET DE CONSTRUCTION*

Pour les ponts métalliques, il s'agit de millimètres et de kilogrammes; les projets sont délicats, quelquefois laborieux; ceux des ponts voûtés, sauf des ouvrages exceptionnels, se dressent sans calculs : ils sont faciles, courants; on s'y contente de formules empiriques.

Ce sont des entrepreneurs spéciaux qui construisent les ponts métalliques : tous les entrepreneurs peuvent faire une voûte.

Souvent, le métal vient de loin : la pierre, le sable, sont sur place ou près.

§ 5. — *SOUS CHEMIN DE FER, ON BALLASTE COMME EN PLEINE VOIE*

On ballaste les ponts en maçonnerie comme en pleine voie.

Il y a continuité dans le matelas du rail, tandis que, dans les ponts métalliques, le train passe du ballast qui fléchit sous lui à des longrines ou des traverses sur tablier rigide.

En passant sur un pont en maçonnerie, un train n'assourdit ni le voisinage, ni les voyageurs.

§ 6. — *QUELQUES CAS OÙ LE PONT VOÛTÉ EST SPÉCIALEMENT INDIQUÉ*

Art. 1. — Traversée d'une vallée profonde. — La grande voûte en maçonnerie est spécialement indiquée par dessus une vallée profonde, à flancs raides, (il n'y a pas de culées, pas d'ouvrages d'accès).

Art. 2. — Ouvrages en courbe. — En courbe de rayon R, une travée métallique de portée $2a$ doit être élargie de la flèche $f = \frac{a^2}{2\,R}$

Il y faut de petites ouvertures [29].

Dans les viaducs en courbe de 100^m des chemins de fer d'intérêt local, la maçonnerie s'impose [30].

29. — Il y a eu économie à faire en maçonnerie avec voûtes de 16^m, le viaduc de l'Altier (Ligne de Brioude à Alais), en courbe de 400^m, hauteur 73^m.

30. — Si R =

Si R =	300^m		100^m	
pour 2a =	60^m	20^m	60^m	20^m
on a f =	1^m 50	0^m 17	4^m 50	0^m 50

CHAPITRE VI

PRÉFÉRENCE DONNÉE AUJOURD'HUI AUX PONTS VOÛTÉS

Il y a quelques années, on a été de la maçonnerie au métal.

Partout aujourd'hui, on revient du métal à la maçonnerie.

On vient de faire en maçonnerie les grands ponts de Toulouse [31], de Valence [32], d'Orléans [33], d'Avignon [34].

Les Chemins de fer de l'État d'Autriche ont préféré systématiquement aux ponts métalliques les grands ponts voûtés sur la ligne Stanislau–Woronienka 1893–1894 (ils y ont coûté moins cher) [35], sur les nouvelles lignes des Alpes [36].

En Italie, les Chemins de fer de l'État remplacent sur les lignes existantes les travées métalliques par des ponts voûtés ou en béton armé [37], et les évitent sur les nouvelles [38].

Sur les 148 kil. du Great Central Railway Extension à Londres, les arches en briques ont été, partout où on l'a pu, préférées aux arcs métalliques, à la fois pour les ponts par-dessus et par-dessous [39].

La plus grande Compagnie américaine, la Pennsylvania R.R., remplace, autant qu'elle le peut, les ponts métalliques par des ouvrages voûtés. Depuis 1900, elle a construit :

sur la Susquehanna, à Rockville, prés de Harrisburg, pour 4 voies, 48 voûtes en plein cintre de $21^{m}336$ (douelle en pierre de taille, queutage en béton) [40], à la place de 23 travées d'acier de $48^{m}77$ sous 2 voies ;

à New-Brunswick, sur la Raritan-River, 21 arches en maçonnerie à 4 voies, (20 arches en plein cintre de $15^{m}54$ à $20^{m}21$, 1 biaise en arc au 1/3 de $21^{m}946$) [41].

A Constantine, on a franchi le Rhumel :

en 1864, sur un arc en fonte de $57^{m}40$;

en 1912, sur deux voûtes jumelles de $68^{m}76$ [42].

31. — I, 193. 32. — I, 173.

33. — III, p. 255. Le Conseil municipal d'Orléans a mis comme condition de la participation de la Ville que le pont serait en maçonnerie (Délibérations du 2 août 1897 et du 6 avril 1899). (III, p. 264, renv. 20).

34. — III, p. 270.

35. — Geschichte der Eisenbahnen der Oesterreichisch-Ungarischen Monarchie, VI Band, 1898-1908, II Band : « *Trassierung, Unterbau und Brückenbau, I, Der Eisenbahnneubau* », Josef Zuffer, K.K. Oberbaurat im Eisenbahnenministerium, p. 60-61.

36. — .... id............. p. 74.

37. — Pour remplacer 20 ouvrages ayant 48 travées de 5 à $41^{m}76$ par 71 arches en maçonnerie ou travées en béton armé, on a dépensé 4.200.328 fr : des tabliers neufs auraient coûté 4.339.325 fr.

Le nombre des ponts métalliques sous rails a été réduit :

sur les lignes de	Florence-Pistoie	Venise-Udine	Bologne-Ancône	Ancône-Orte	Modène-Vérone	
de	85	32	41	79	32	269
à	42	15	22	46	10	135

Bulletin de l'Association du Congrès international des Chemins de fer, Berne 1910, Janvier, volume XXIV, n° 1, p. 325 à 410. — M. Randich, Ingénieur du Service de l'Entretien des Chemins de fer de l'Etat italien.

38. — Sur 433 kil. de lignes concédées en 1888, la Compagnie des Chemins de fer méridionaux n'a posé aucun tablier métallique. L'excédent de dépense est insignifiant.

39. — The Engineer, 21 juin 1901.

40. — Engineering News, 10 mai 1900, p. 310, 311 : « *The 3820 ft stone arch bridge for the Pennsylvania RR, at Rockville. Pa* ».

Engineering News, 12 décembre 1901, p. 448 : « *Methods of construction of the 3820 ft stone arch bridge at Rockville, Pa; Pennsylvania RR.* »

41. — Engineering News, 18 juin 1903, p. 538 : « *The Raritan River stone Arch bridge of the Pennsylvania RR, at New Brunswick NJ* ».

42. — II, p. 107.

TITRE II

VOÛTES DE 40^{M} DE PORTÉE ET PLUS, CLASSÉES PAR PAYS

1° PAR INTRADOS, 2° PAR PORTÉE, 3° PAR DATE

PLUS GRANDE VOÛTE A CHAQUE ÉPOQUE

Pour le sens des symboles **C^{1}**. **C^{n}**, **E^{1}**. .. **$\widehat{A}^{1}$**,...... r^{te}. F^{r}, f^{r}, aq. *voir* *Préliminaires, p. 3*

		FRANCE	LUXEMBOURG	ITALIE	ANGLETERRE	ALLEMAGNE	AUTRICHE	SUISSE	NORVÈGE	ÉTATS-UNIS	Plus gde portée	NOMBRE d'ouvrages	NOMBRE de vtes ≥ 40m
PLEINS CINTRES (Tome I) sous route	C¹ rte	1321-39 Céret 45m45 1824-31 Vieille-Brioude 45m 1860-61 St Sauveur 42m 1869-73 Collonges 40m						1899-1900 Brent 44m			45m45	5	5
PLEINS CINTRES sous route	Cⁿ rte	1745-52 Ornaisons 42m9								Avenue du Connecticut à Washington 1899-1908 45m72	45m72	2	6
PLEINS CINTRES sous chemin de fer	C¹ Fr	1881-82 Oloron 40m 1898-1900 Rebuzo 40m			1846-48 Ballochmyle 55m17						55m17	3	3
PLEINS CINTRES sous chemin de fer	C¹ fr							1901-02 Solis 42m			42m	1	1
PLEINS CINTRES sous chemin de fer	Cⁿ Fr	1855-56 Nogent-s-Marne 50m			1836-38 Victoria 43m89						50m	1¹	5
Plus grande portée / Nombre d'ouvrages / de vtes ≥ 40m		50m (Nogent-s-Marne) 8 11			55m17 (Ballochmyle) 1¹ 2			44m (Brent) 2 2		45m72 (Av. Connecticut) 1 5	55m17 Ballochmyle	12	20
ELLIPSES ou ANSES DE PANIER (Tome I) SURBAISSÉES sous route	E¹ rte	1751-66 Vizille 41m08 1773-91 Lavaur 48m73 1776-1810 Gignac 48m42 1862-63 Fium'alto 40m 1886 St-Pierre 40m		1868-70 Annibal 55m 1871-72 Diable 55m	1826-27 Gloucester 45m72					Avenue Edmondson. à Baltimore 1908-09 42m37	55m	9	9
SURBAISSÉES sous route	Eⁿ rte	1854-55 Alma 43m 1873-75 Mantes 40m 1895-97 Verdun-s-Doubs 41m 1901-05 Valence 49m20			1824-31 Londres 46m33 42m67 Edouard VII, à Kew 1901-03 40m54		Empereur-François à Prague 1898-1901 42m34				49m20	7	12
SURBAISSÉES sous route	Eⁿ Eⁿ rte	1904-07 Amidonniers 46m 42m									46m	1	6
SURBAISSÉES	Eⁿ aq	1870-73 Pont-st-Yonne 40m									40m	1	1
SURBAISSÉES sous chns de fer	E¹ Fr	1871-72 Signac 40m 1905-06 Verdon 40m									40m	2	2
SURBAISSÉES sous chns de fer	Eⁿ Fr									Big-Muddy-Rivr 1901-03 42m67	42m67	1	3
SURHAUSSÉES	E^1_h fr							1907-09 Wiesen 55m			55m	1	1
Plus grande portée / Nombre d'ouvrages / de vtes ≥ 40m		49m20 (Valence) 13 21		55m (Annibal, Diable) 2 2	46m33 (Londres) 3 5		42m34 (Empr François) 1 1	55m (Wiesen) 1 1		42m67 (Big-Muddy-Rr) 2 4	55m Annibal Diable Wiesen	22	34
SURBAISSÉES ≥ 1/2, 1/3 (Tome II) sous route	Â¹ rte	1340-1479 Vieille-Brioude 54m26 (Ancien Pt, écroulé en 1822) 1351-1407 Nyons 40m53 1351-1583 Tournon 49m20 1608-11 Claix 46m35		1832-36 Crespano 40m40			1842-46 St-Etienne 43m60	1840-44 Nydeck 45m90			49m20	7²	7²
sous route	Â¹ Â¹ rte	1908-12 Sidi-Rached, à Constantine 68m76	Adolphe 1899-1903 84m65							Walnut-Lane 1906-08 70m71 Rocky-River 1908-10 85m34	85m34	4	8
sous chemin de fer	Â¹ Fr	1860-61 Berdoulet 40m 1882-83 Castelet 41m20 1882-84 Lavaur 61m50 1883-84 Antoinette 50m 1883-85 Céret 45m 1907-09 Escot 56m				Kleinwolmsdorf 1844-45 45m32	Waldlitobel 1883-84 41m Palmgraben 1904-05 49m Schalchgraben 1904-05 52m Rothweinbach 1904-06 41m				61m50	11	11
sous chemin de fer	Â¹ fr	1884 Gravona 43m53 1906-08 Ramounails [illegible]						46m98 Cinuskel 1910-12 1911-12 Tuoi 47m71			47m71	4	4
											49m[illegible]	1	1

	Nombre de v^tes ≥ 40^m	14³	2	1	1	1	5	3		4	River		31³
ARCS — ASSEZ SURBAISSÉS 1/2,3 à 1/7 — sous route	$\widehat{A}^1$ r^te	1873-74 Clary 52^m 1882 Saulnier 43^m (écroulé en 1912) 1908-09 Montanges 80^m29		1370-77 Trezzo 72^m détruit en 1416 Bains-de-Lucques. 1845-47, 74-77 47^m84	Pont-y-tu-Pridd 1749-50 42^m67 Chester 1833-34 60^m96	1903-05 Plauen 90^m		Guggersbach 1906 50^m20		1886 Elyria 45^m72 1891-92 Wheeling 48^m46 1895-97 Bellefield 45^m72	90^m	12³	12³
	$\widehat{A}^n$ r^te	1908-11 Seythenex 41^m19		1354-56 Vérone 48^m70							48^m70	2	2
	$\widehat{A}^1$ aq									1857-64 Cabin-John 67^m10	67^m10	1	1
sous chemin de fer	$\widehat{A}^1$ F^r	1888-89 Gour-Noir 62^m 1890 Pouch 47^m85 1890-91 Freyssinet 45^m 1908-10 Lusserat 45^m70		1851-52 Maretta 40^m 1851-52 Prarolo 40^m 1852 Isola del Cantone 40^m P^t en amont et P^t en aval 1877-78 Calcio 42^m 1901-02 Diveria 40^m		1899-1900 Gutach 64^m 1899-1900 Schwandeholzdobel 57^m 1901-02 Chemnitz 45^m 1907-09 Langenbrand 59^m	1893-94 Jaremcze 65^m Jamna 48^m Worochta 40^m 1904-1905 Krenngraben 40^m Steyrling 70^m 1904-06 Salcano 85^m	Lichtensteig 1907-09 42^m82 Krummenau 1910-11 63^m26	Strandeelven 1902-04 41^m Svenkerud 1905-07 44^m Boïlefos 1908-19.. 40^m		85^m	25	25
	$\widehat{A}^n$ F^r						1904-06 Canale 40^m				40^m	1	3
	Plus grande portée	80^m29 (Montanges)		48^m70 (Vérone)	60^m96 (Chester)	90^m (Plauen)	85^m (Salcano)	63^m26 (Krummenau)	44^m (Svenkerud)	67^m10 (Cabin-John)	90^m Plauen	41²	43³
	Nombre d'ouvrages	8²		9³	2	5	7	3	3	4			
	Nombre de v^tes ≥ 40^m	8²		9³	2	5	9	3	3	4			
TRÈS SURBAISSÉS ≤ 1/7 (Tome III) — sous route	$\overline{A}^1$ r^te			1834 Mosca, à Turin 45^m		1882 Teinach 46^m 1889 Huzenbach 41^m50 1904 Wengern 50^m 1905 Ziegenhals 40^m 1905-06 Michelau 42^m 1905 Neuhammer 52^m 1907 Schwusen 48^m 1907 Kupferhammer 48^m					52^m	9	9
	$\overline{A}^n$ r^te	1888-90 Boucicaut 40^m 1904-06 Orléans 43^m85 1905-09 Avignon 40^m			1882-83 Putney 43^m89	1903-04 Mehring 46^m 1905 Krappitz 50^m 1906 Gross-Kunzendorf 40^m 1905-06 Schweich 46^m 1907-08 Trittenheim 46^m 1909-11 Longuich 46^m43					50^m	10	38
	$\overline{A}^1$ aq					1875 Weisenbach 40^m					40^m	1	1
	$\overline{A}^1$ F^r									1899 Bellows-Falls 42^m67	42^m67	1	2
	Plus grande portée	43^m85 (Orléans)		45^m (Mosca, à Turin)	43^m89 (Putney)	52^m (Neuhammer)				42^m67 (Bellows-Falls)	52^m Neuhammer	21	50
	Nombre d'ouvrages	3		1	1	15				1			
	Nombre de v^tes ≥ 40^m	22		1	1	24				2			
Pour toutes les v^tes en arc	Plus grande portée	80^m29 (Montanges)	84^m65 (Adolphe)	48^m70 (Vérone)	60^m96 (Chester)	90^m (Plauen)	85^m (Salcano)	63^m26 (Krummenau)	44^m (Svenkerud)	85^m34 (Rocky-River)	90^m Plauen	89	124⁵
	Nombre d'ouvrages	24²	1	11	4	21	12	6	3	7			
	Nombre de v^tes ≥ 40^m	44²	2	11	4	30	14	6	3	10			
Pour toutes les v^tes	Plus grande portée	80^m29 (Montanges)	84^m65 (Adolphe)	55^m (Annibal, Diable)	60^m96 (Chester)	90^m (Plauen)	85^m (Salcano)	63^m26 (Krummenau)	44^m (Svenkerud)	85^m34 (Rocky-River)	90^m Plauen	123	178
	Nombre d'ouvrages	45¹	1	13³	8	21	13	9	3	10			
	Nombre de v^tes ≥ 40^m	76¹	2	13³	11	30	15	9	3	19			

1. Le pont Victoria, a une voûte en plein cintre de 41^m8) et une voûte en arc peu surbaissé de 48^m77 il est compté dans les « Arcs peu surbaissés ».
2. Dont 1 écroulé e. 3. Dont 1 ruiné e. 4. Dont 2 écroulé(e)s. 5. Dont 1 ruiné (e) et 2 écroulé(e)s

TABLEAU II VOÛTES INARTICULÉES ET ARTICULÉES DE 40m ET PLUS, CLASSÉES PAR PAYS ET PAR DATE

Les voûtes articulées sont en italiques.

Siècle		FRANCE	LUXEMBOURG	ITALIE	ANGLETERRE	ALLEMAGNE	AUTRICHE	SUISSE	NORVÈGE	ÉTATS-UNIS	Plus gde Portée	NOMBRE d'ouvrages	NOMBRE de v.tes > 40m
XIVe		1321-39 Céret (Vieux Pt) C1 rte 45m45		1354-56 Vérone A2 rte 48m70 1370-77 Trezzo A1 rte 72m détruit en 1416							72m détruite 48m70	31	31
XVe		1340-1479 Vieille-Brioude (Anc. Pt) écroulé en 1822 A1 rte 54.26 1351-1407 Nyons A rte 40.53 1351-1583 Tournon A1 rte 49.20									54m26 écroulée 49m20	32	32
XVIe													
XVIIe		1608-11 Claix (Vieux Pt) A1 rte 46.35									46m35	1	1
XVIIIe	1701-1750	1745-52 Ornaisons C2 rte 42.90			1749-50 Pont-y-tu-Pridd A1 rte 42m67						48m73	5	5
	1751-1800	1751-66 Vizille E1 rte 41.08 1773-91 Lavaur (Vieux Pt) E1 rte 48.73 1776-1810 Gignac E1 rte 48.42											
XIXe	1801-1825										Voûtes inarticulées 67m10	60²	71²
	1826-1850	1824-31 Vieille-Brioude (Pont actuel) C1 rte 45		1834 Mosca, à Turin A1 rte 45m 1845-47, 1874-77 Bains-de-Lucques A1 rte 47m84 1832-36 Crespano A1 rte 40m40	1824-31 Londres E2 rte 46m33, 42m67 1826-27 Gloucester E1 rte 45m72 1833-34 Chester A1 rte 60m96 1836-38 Victoria A2 Fr 48m77, 43m89 1846-48 Ballochmyle C1 Fr 55m17	1844-45 Kleinwolmsdorf A1 Fr 45m32	1842-46 St-Etienne A1 rte 43m60	1840-44 Nydeck A1 rte 45m90					
	1851-1880	1854-55 Alma E2 rte 43m 1855-56 Nogent-s/-Marne C2 Fr 50 1860-61 St-Sauveur C1 rte 42 1860-61 Berdoulet A1 Fr 40 1862-63 Fium'Alto E1 rte 40 1869-73 Collonges C1 rte 40 1870-73 Pont-s/-Yonne E2 aq 40 1871-72 Signac E1 Fr 40 1873-74 Claix A1 rte 52 1873-75 Mantes E2 rte 40		1851-52 40m Maretta, Prarolo A1 Fr 1852 Isola del Cantone Pt en amont et Pt en aval A1 Fr 40m 1868-70 Annibal E1 rte 55m 1871-72 Diable E1 rte 55m 1877-78 Calcio A1 Fr 42m						1857-64 Cabin-John A1 aq 67m10	Voûtes articulées *59m10*	*10*	*13*
	1881-1890	1881-82 Oloron C1 Fr 40 1882 Saulnier A1 rte 43 écroulé en 1912 1882-83 Castelet A1 Fr 41.20 1882-84 Lavaur A1 Fr 61.50 1883-84 Antoinette A1 Fr 50 1884 Gravona A1 Fr 43.53 1883-85 Ceret A1 Fr 45 1886 St-Pierre F rte 40 [illegible] A [illegible]			1882-83 Putney A2 rte 43m89	1882 Teinach A1 rte 46m 1885 Weisenbach A1 aq 40m *1885 Höfen A1 rte 41m* *1886-87 Marbach A1 rte 43m50* 1889 Huzenbach A1 rte 41m50 *1889 Baiersbronn A1 rte 40m*	1883-84 Wäldlitobel A1 Fr 41m			1886 Elyria A1 rte 45m72			

1891-1900					1899-1900 Schwandebelzdobel A^1 F^r 57^m Neckarhausen A^1 r^{te} 59^{m}40 Grasdorf A^1 r^{te} 40^m 1899-1901 Malling A^1 F^r 40^m	1898-1901 Empereur-François, à Prague E r^{te} 42^{m}34	1899-1900 Brent C^1 r^{te} 44^m		1899 Bellows-Falls A^1 F^r 42^{m}67			
XXe	1901-05 Valence E^n r^{te} 49.20 1904-06 Orléans A^n r^{te} 43.85 1904-07 Amidonniers E^{r}E^a r^{te} 46^m & 42 1905-06 Verdon E^1 F^r 40 1905-09 Avignon A^n r^{te} 40 1906-08 Ramounails A^1 f^r 40.30 1907-09 Escot A^1 F^r 56 1908-09 Montanges A^1 r^{te} 80.29 1908-11 Seythenex A^n r^{te} 41.19 1908-10 Lusserat A^1 F^r 45.70 1908-12 Constantine A^1 A^1 r^{te} 68.76	1899-1903 Adolphe A^1 A^1 r^{te} 84^{m}65	1901-02 Diveria A^1 F^r 40^m *1902-03 Morbegno* A^1 *F^r 70^m*	1901-03 Edouard VII à Kew E^n r^{te} 40^{m}54	*1900-01 Prince-Régent* A^1 *r^{te} 63^m* 1901-02 Chemnitz A^1 F^r 45^m *1901-02 Max-Joseph* A^1 *r^{te} 61^m* *1901-03 Hochberg* A^n *r^{te} 40^m* *1902-03 Cornélius* A^n *r^{te} 44^m* *1902-03 Reichenbach* A^n *r^{te} 44^m* *1903-04 Illerbeuren* A^1 *F^r 59^m* 1903-04 Mehring A^n r^{te} 46^m *1903-04 Göhren* A^1 *r^{te} 60^m* 1903-05 Plauen A^1 r^{te} 90^m *1903-05 Neckargartach* A^n *r^{te} 40^m* *1903-05 Maximilien* A^n *r^{te} 45^{m}87* 1904 Wengern A^1 r^{te} 50^m *1904-05 Wallstrasse* A^1 *r^{te} 65^{m}45* *1904-05 Moulins-lez-Metz* A^n *r^{te} 44^m / 40^m* *1904-05 Wittelsbach* A^n *r^{te} 44^m* 1905 Ziegenhals A^1 r^{te} 40^m 1905 Krappitz A^n r^{te} 50^m 1905-06 Michelau A^1 r^{te} 42^m 1905-06 Schweich A^n r^{te} 46^m *1905-08 Mannheim* A^n *r^{te} 59^{m}50* 1905 Neuhammer A^1 r^{te} 52^m 1906 Gross-Kunzendorf A^n r^{te} 40^m *1906 Kempten* A^1 *F^r 61^{m}50 / 63^{m}80* *1906-07 Elise* A^1 *r^{te} 47^{m}50* 1907 Schwusen A^1 r^{te} 48^m 1907 Kupferhammer A^1 r^{te} 48^m 1907-08 Trittenheim A^n r^{te} 46^m *1907-08 Garching* E^n *F^r 44^{m}35* 1907-09 Langenbrand A^1 F^r 59^m 1909-11 Longuich A^n r^{te} 46^m / 43^m *1911-12 Gräveneck* A^1 *r^{te} 48^m*	1904-05 A^1 F^r Krenngraben 40^m Palmgraben 49^m Schalchgraben 52^m Steyrling 70^m 1904-06 A^1 F^r Salcano 85^m Rothweinbach 41^m 1904-06 Canale A^n F^r 40^m	1901-02 Solis C^1 f^r 42^m 1906 Guggersbach A^1 r^{te} 50^{m}20 1907-09 Wiesen E^1_h f^r 55^m 1907-09 Lichtensteig A^1 F^r 42^{m}82 1910-11 Krummenau A^1 F^r 63^{m}26 1910-12 Cinuskel A^1 f^r 46^{m}98 1911-12 Tuoi A^1 f^r 47^{m}71	1902-04 Strandeelven A^1 F^r 41^m 1905-07 Svenkerud A^1 F^r 44^m 1908-19 Boïlefos A^1 F^r 40^m	1899-1908 Avenue du Connecticut à Washington C^n r^{te} 45^{m}72 1901-03 Big-Muddy E^n F^r 42^{m}67 1906-08 Walnut Lane à Philadelphie A^1 A^1 r^{te} 70^{m}71 1908-09 Avenue Edmondson à Baltimore E^1 r^{te} 42^{m}37 1908-10 Rocky-River près de Cleveland A^1 A^1 r^{te} 85^{m}34	Voûtes inarticulées 90^m *Voûtes articulées* *70^m*	51 *20*	95 *29*
Plus g^{des} voûtes — inarticulées	80^{m}29 (Montanges)	84^{m}65 (Adolphe)	48^{m}70 (Vérone)	60^{m}96 (Chester)	90^m (Plauen)	85^m (Salcano)	63^{m}26 (Krummenau)	44^m (Svenkerud)	85^{m}34 (Rocky-River)	90^m		
Plus g^{des} voûtes — *articulées*	»	»	*70^m Morbegno*	»	*65^{m}45 (Wallstrasse)*	»	*40^m (Coulouvrenière)*	»	»	*70^m*		
Nombre d'ouvrages — inarticulés	45[3]	1	13[1]	8	21	13	9	3	10		123[4]	
Nombre d'ouvrages — *articulés*	»	»	*1*	»	*28*	»	*1*	»	»		*30*	
Nombre de v^{tes} $\geq$ 40^m — inarticulées	76[3]	2	13[1]	11	30	15	9	3	19			178[4]
Nombre de v^{tes} $\geq$ 40^m — *articulées*	»	»	*1*	»	*39*	»	*2*	»	»			*42*

1. — Dont 1 ruiné(e). 2. — Dont 1 écroulé(e). 3. — Dont 2 écroulé(e)s. 4. — Dont 1 ruiné(e) et 2 écroulé(e)s.

TABLEAU III VOÛTES INARTICULÉES ET ARTICULÉES DE 40^m ET PLUS, CLASSÉES PAR PAYS ET PAR PORTÉE

Les voûtes articulées sont en italiques.

Portée de (exclus)	Portée à (inclus)	FRANCE	LUXEMBOURG	ITALIE	ANGLETERRE	ALLEMAGNE	AUTRICHE	SUISSE	NORVÈGE	ÉTATS-UNIS	Nombre d'ouvrages inarticulés	Nombre d'ouvrages *articulés*	Nombre de voûtes ≥ 40^m inarticulées	Nombre de voûtes ≥ 40^m *articulées*
	90^m					Plauen 1903-05 A^1 r^{re} 90^m					1		1	
90	85						Salcano 1904-06 A F^r 85^m			Rocky River près de Cleveland 1908-10 A A^1 r^{re} 85^{m}34	2		3	
85	80	Montanges 1908-09 A^1 r^{re} 80^{m}29	Adolphe 1899-1903 A A^1 r^{re} 84^{m}65								2		3	
80	75													
75	70			Trezzo 1370-77 ruiné en 1416 A^1 r^{re} 72^m *Morbegno* 1902-03 A^1 r^{re} 70^m			Steyrling 1904-05 A^1 F^r 70^m			Walnut Lane à Philadelphie 1906-08 A^1 A^1 r^{re} 70^{m}71	3^1	*1*	4^1	*1*
70	65	Sidi-Rached, à Constantine 1908-12 A A^1 r^{re} 68^{m}76				*Wallstrasse à Ulm* *1904-05* A^1 r^{re} 65^{m}15	Jaremcze 1893-94 A^1 F^r 65^m			Cabin-John 1857-64 A aq 67^{m}10	3	*1*	1	*1*
65	60	Gour-Noir 1888-89 A^1 F^r 62^m Lavaur 1882-84 A^1 F^r 61.50			Chester 1833-34 A^1 r^{re} 60^{m}96	*Kempten 1 Pont à 2 voies)* *1906* A^1 F^r 64^{m}50 Gutach 1899-1900 A^1 F^r 64^m *Max-Joseph, à Munich* *1901-02* A^1 r^{re} 64^m *Kempten (2 P^{ts} à 2 voies, accolés)* *1906* A^1 F^r 63^{m}80 *Prince-Régent, à Munich* *1900-01* A^1 r^{re} 63^m *Göhren* *1903-01* A^1 r^{re} 60^m		Krummenau 1910-11 A^1 F^r 63^{m}26			3	*6*	3	*6*
60	55	Escot 1907-09 A^1 F^r 56^m		Annibal 1868-70 E^1 r^{re} 55^m Diable 1871-72 E^1 r^{re} 55^m	Ballochmyle 1846-48 C^1 F^r 55^{m}17	*Mannheim* *1905-08* A^1 r^{re} 59^{m}50 *Neckarhausen* *1899-1900* A^1 r^{re} 59^{m}10 *Munderkingen* *1893* A^1 r^{re} 59^m Langenbrand 1907-09 A^1 F^r 59^m *Illerbeuren* *1903-01* A^1 F^r 59^m Schwandeholzdobel 1899-1900 A^1 F^r 57^m		Wiesen 1907-09 E^1_h f^r 55^m			7	*4*	7	*5*
[illegible]	[illegible]	Vieille-Brioude 1340-1479 A^1 r^{re} 54^{m}26 [illegible]				Neuhammer 1905 A r^{re} 52^m Wengern 1904 A^1 r^{re} 50^m [illegible]	Schalchgraben 1904-05 [illegible]	Guggersbach 1906			9^2		12^2	

50	45	Tournon 1351-1583 A r 49.20 Lavaur (Vieux P^t) 1773-91 E r 48.73 Gignac 1776-1810 E r 48.42 Pouch 1890 A F^r 47.85 Claix 1608-11 A^1 r^e 46.35 Amidonniers 1904-07 E^n E^l r^{te} 46 Lusserat 1908-10 A^1 F^r 45.70 Céret (Vieux P^t) 1321-39 C r^{te} 45.45 Freyssinet 1890-91 A^1 F^r 45 Céret 1883-85 A^1 F^r 45 Vieille-Brioude 1824-31 C^1 r^{te} 45 (Pont actuel)		A [illegible] Bains-de-Lucques 1845-47, 74-77 A r^{te} 47^{m}84 Mosca, à Turin 1834 A^1 r^{te} 45^m	A [illegible] Londres 1824-31 E r^e 46^{m}33 Gloucester 1826-27 E^l r^{te} 45^{m}72	[illegible] [illegible] A [illegible] *Graveneck* *1911-12* A r 48^m *Inzigkofen* *1895* A^1 r 47^{m}90 *Elise* *1906-07* A r 47^{m}50 Temach 1882 A^1 r^{te} 46^m Mehring 1903-04 Schweich 1905-06 Trittenheim 1907-08 } A^n r^{te} 46^m Longuich 1909-11 *Maximilien* *1903-05* A^n r^{te} 45^{m}87 Kleinwolmsdorf 1844-45 A^1 F^r 45^{m}32 Chemnitz 1901-02 A^1 F^r 45^m	A F^r 49^m Jamna 1893-94 A^1 F^r 48^m	A [illegible] Cinuskel 1910-12 A^1 F^r 46^{m}98 Nydeck 1840-44 A^1 r^{te} 45^{m}90		[illegible] A r^{te} 48^{m}46 Elyria 1886 A^1 r^{te} 45^{m}72 Bellefield à Pittsburg 1896-97 A^1 r^{te} 45^{m}72 Avenue du Connecticut à Washington 1899-1908 C^n r^{te} 45^{m}72	34	*4*	31	*5*
45	40	Orléans 1904-06 A^n r^{te} 43^{m}85 Gravona 1884 A^1 f^r 43.53 Alma 1854-55 E^n r^{te} 43 Saulnier 1882 A^1 r^{te} 43 (écroulé en 1912) Ornaisons 1745-52 C^n r^{te} 42.90 Amidonniers 1904-07 E^n E^n r^{te} 42 Saint-Sauveur 1860-61 C^1 r^{te} 42 Castelet 1882-83 A^1 F^r 41.20 Seythenex 1908-11 A^n r^{te} 41.19 Vizille 1751-66 E^1 r^{te} 41.08 Verdun-s-l-Doubs 1895-97 E^n r^{te} 41 Nyons 1351-1407 A^1 r^{te} 40.53 Ramounails 1906-08 A^1 f^r 40.30 Berdoulet 1860-61 A^1 F^r Fium'Alto 1862-63 E^1 r^{te} Collonges 1869-73 C^1 r^{te} Pont-sur-Yonne 1870-73 E^n aq Signac 1871-72 E^1 F^r Mantes 1873-75 E^n r^{te} Oloron 1881-82 C^1 F^r St-Pierre 1886 E^1 r^{te} Boucicaut 1888-90 A^n r^{te} Rébuzo 1898-1900 C^1 F^r Verdon 1905-06 E^1 F^r Avignon 1905-09 A^n r^{te} (Berdoulet à Avignon : 40^m)		Calcio 1877-78 A^1 F^r 42^m Crespano 1832-36 A^1 r^{te} 40^{m}40 40^m, A^1 F^r : Maretta 1851-52 Prarolo 1851-52 Isola del Cantone 1852 Pont en amont et Pont en aval Diveria 1901-02	Victoria 1836-38 A^n F^r 43^{m}89 Putney 1882-83 A^n F^r 43^{m}89 Pont-y tu-Pridd 1749-50 A^1 r^{te} 42^{m}67 Edouard VII, à Kew 1901-03 E^n r^{te} 40^{m}54	*Garching* *1907-08* E^n *F^r 44^{m}35* *Cornélius* *1902-03* *Reichenbach* *1902-03* *Wittelsbach* *1904-05* } A^n *r^{te} 44^m* *Moulins-lez-Metz* *1904-05* *Marbach* *1886-87* A^1 *r^{te} 43^{m}50* *Chemnitz* *1898-1900* E^n *F^r 43^{m}10* Longuich 1909-11 A^n r^{te} 43^m Michelau 1905-06 A^1 r^{te} 42^m Huzenbach 1889 A^1 r^{te} 41^{m}50 *Höfen* *1885* A^1 *r^{te} 41^m* Weisenbach 1885 A^1 aq *Baiersbronn* *1889* A^1 *r^{te}* *Grasdorf* *1899-1900* A^1 *r^{te}* *Malling* *1899-1901* A^n *r^{te}* *Hochberg* *1901-03* A^n *r^{te}* *Neckargartach* *1903-05* A^n *r^{te}* *Moulins-lez-Metz* *1904-05* A^n *r^{te}* Gross-Kunzendorf 1906 A^n r^{te} Ziegenhals 1905 A^1 r^{te} (Weisenbach à Ziegenhals : 40^m)	Saint-Etienne 1842-46 A^n r^{te} 43^{m}60 Empereur-François 1898-1901 E^n r^{te} 42^{m}34 Wäldlitobel 1883-84 A^1 F^r 41^m Rothweinbach 1904-06 A^1 F^r 41^m Worochta 1893-94 A^1 F^r 40^m Krenngraben 1904-05 A^1 F^r 40^m Canale 1904-06 A^n F^r 40^m	Brent 1899-1900 C^1 r^{te} 44^m Lichtensteig 1907-09 A^1 F^r 42^{m}82 Solis 1901-02 C^1 f^r 42^m *Coulourrenière* *1895-96* A^n *r^{te} 40^m*	Svenkerud 1905-07 A^1 F^r 44^m Strandeelven 1902-04 A^1 F^r 41^m Boïlefos 1908-19.. A^1 F^r 40^m	Bellows-Falls 1899 A^1 F^r 42^{m}67 Big-Muddy 1901-03 E^n F^r 42^{m}67 Avenue Edmondson à Baltimore 1908-09 E^1 r^{te} 42^{m}37	37 [2]	*14*	88 [2]	*24*

1. — Dont 1 ruiné(e). 2. — Dont 1 écroulé(e).

PLUS GRANDE VOÛTE A CHAQUE ÉPOQUE DEPUIS 1339

IV. — A SUIVANT LA FORME DE L'INTRADOS

A partir de	VOÛTES INARTICULÉES: C	E	E_h	$\overset{\frown}{A}$	$\widehat{A}$	$\overline{A}$	VOÛTES: SEMI-ARTICULÉES	ARTICULÉES
1339 1356	45m45 Céret (Vieux Pont) C¹ pte *France*				48m70 Vérone Aⁿ pte *Italie*			
1377 1407				40m53 Nyons A¹ pte *France*	72m25 Trezzo (détruit en 1416) A¹ pte *Italie*			
1416 1479 1766		41m08 Vizille E¹ pte *France*		54m26 Vieille-Brioude (Ancien Pont, écroulé en 1822) A¹ pte *France*	48m70 Vérone Aⁿ pte *Italie*			
1791		48m73 Lavaur (Vieux Pont) E¹ pte *France*						
1822 1834 1848	55m17 Ballochmyle C¹ Fr *Angleterre*			49m20 Tournon A¹ pte *France*	60m96 Chester A¹ pte *Angleterre*	45m Mosca, à Turin A¹ pte *Italie*		
1864 1870 1882 1884 1885		55m Annibal E¹ pte *Italie*		61m50 Lavaur A¹ Fr *France*	67m10 Cabin-John A¹ aq *Etats-Unis*	46m Teinach A¹ pte *Allemagne*	41m Höfen A¹ pte *Allemagne*	
1887							43m50 Marbach A¹ pte *Allemagne*	
1893 1895							59m Munderkingen A¹ pte *Allemagne*	47m90 Inzigkofen A¹ pte *Allemagne*
1900								59m40 Neckarhausen A¹ pte *Allemagne*
1901								63m Prince-Régent A¹ pte *Munich*
1902 1903 1904				84m65 Adolphe à Luxembourg A¹ A¹ pte *Luxembourg*		50m Wengern A¹ pte *Allemagne*	70m Morbegno A¹ Fr *Italie*	64m Max-Joseph à Munich A¹ pte *Allemagne*
1905 1909			55m Wiesen E^1_h fr *Suisse*		90m Plauen A¹ pte *Allemagne*	52m Neuhammer A¹ pte *Allemagne*		65m45 Wallstrasse à Ulm A¹ pte *Allemagne*
1910				85m34 Rocky-River				

IV. — B SANS TENIR COMPTE DE LA FORME DE L'INTRADOS

De – à	soit pendant	La plus grande voûte a été celle du Pont de :	Portée	Plus grande que la précédente de :	Pays
1-2		*Toutes ces voûtes sont inarticulées*			
1339 – 1356	17 ans	Céret (Vieux Pont) C¹ pte (⩾ 40m)¹	45m45	»	*France*
1356 – 1377	21 —	Vérone $\widehat{A}$n pte (⩾ 40m)¹	48m70	3m25	*Italie*
1377 – 1416	39 —	Trezzo (ruiné en 1416) $\widehat{A}$¹ pte (⩾ 40m)¹	72m	23m30	*Italie*
1416 – 1479	63 —	Vérone $\widehat{A}$n pte (⩾ 40m)¹	48m70	»	*Italie*
1479 – 1822	343 —	Vieille-Brioude Ancien Pt écroulé en 1822 $\overset{\frown}{A}$¹ pte (⩾ 40m)¹	54m26	5m56	*France*
1822 – 1834	12 —	Tournon $\overset{\frown}{A}$¹ pte (⩾ 40m)³	49m20	»	*France*
1834 – 1862	28 —	Chester $\widehat{A}$¹ pte (⩾ 40m)³	60m96	11m76	*Angleterre*
1862 – 1903	41 —	Cabin-John $\widehat{A}$¹ aq (⩾ 40m)¹	67m10	6m14	*Etats-Unis*
1903 – 1905	2 —	Luxembourg $\overset{\frown}{A}$¹ $\widehat{A}$¹ pte (⩾ 40m)¹	84m65	17m55	*Luxembourg*
1905 –		Plauen $\widehat{A}$¹ pte (⩾ 40m)¹⁰	90m	5m35	*Allemagne*

1. — Existaient alors : le Pont sur le Serchio, près de Lucques (36m80, an 1000, (Ⅲ₂, p. 83) Croizette-Desnoyers, Tome I, p. 36. Pl. IV, fig. 12, le Pont d'Avignon (plus grande arche : 31m80 — XIIe siècle), T II, p. 25 renvoi 3 ; le Pont Saint-Esprit (plus grande arche 35m20 — XIIIe siècle, T II, p. 25 renvoi 5.

La plus grande voûte romaine, celle du Pont Auguste, à Narni, avait 31m75 ? Elle [illegible]

TITRE III

POURQUOI N'A-T-ON PAS ENCORE FAIT DE VOÛTES DE PLUS DE 100^{m} ?

Aujourd'hui, on a d'excellents ciments, on sait faire une voûte : il est permis d'être hardi, et on n'y court pas grand risque : une voûte bien fondée, bien faite, en bons matériaux, ne peut tomber [1, 2, 3, 4, 5].

Il y a quelque 120 ans, Perronet recherchait « *les moyens que l'on pourrait* « *employer pour construire de grandes arches de pierre de 200, 300, 400 et* « *jusqu'à 500 pieds d'ouverture, qui seraient destinées à franchir de profondes* « *vallées bordées de rochers escarpés* » [6] (65^{m}, 97^{m}, 130^{m}, 162^{m}).

Plauen [7] a 90^{m} de portée et, sur 30^{m} de part et d'autre de la clef, 105^{m} de rayon : c'est le cerveau d'un plein cintre de 210^{m}.

On a déjà étudié des voûtes de 100^{m} [8, 9, 10] et plus [11, 12, 13].

1. — Le pont de Trezzo (III, p. 19) n'est pas tombé : on l'a jeté par terre.

2. — La voûte de Vieille-Brioude (II, p. 15) a péri parce qu'elle était en un tuf tendre, usé, pourri, et qu'on l'a mal garantie. Cependant, elle a duré environ quatre siècles : il a fallu, pour en venir à bout, la surcharger de remblai, et encore y a-t-elle résisté quelques années.

3. — Les voûtes de Neuilly (anses de panier de 39^{m} au 1/4) ont, sans accident, tassé après la pose de la clef de 63^{c} (V, p. 171, renvoi 14).

Sans que les voûtes fussent compromises, les piles de l'Alma ont tassé de 37^{c} et 51^{c} (I, p. 157), celles de Nantes, de 27^{c}, 40^{c}, 47^{c} (Morandière, *Construction des Ponts*, p. 379).

4. — Voûtes d'essai en arc très surbaissé de Vassy et de Souppes (III, p. 375) ; voir aussi V, p. 20.

5. — La voûte articulée en béton de l'Exposition de Dusseldorf, 1902, tenait encore à 196^{k} de pression, 30^{k} de tension (IV, p. 278, renvoi 9).

6. — Paris, Imprimerie du Louvre, 1793.

7. — III, p. 52.

8. — M. Tourtay en a esquissé un projet : voûte mince à 3 articulations, de 64^{m} de portée, 8^{m} de flèche, appuyée sur des culées épaisses en surplomb de 18^{m} ; intrados, extrados et chaussée en chaînette, tympans évidés ; épaisseur à la clef $1^{m}40$; pression moyenne, 31^{k}.
(Génie Civil, 18 juin 1892).

9. — Pour un pont-route sur le Rhin à Worms, on avait proposé une arche de 100^{m} entre 2 de 96^{m}, en briques, à 3 articulations de basalte.
(Allgemeine Bauzeitung, 1898, p. 19 à 24, Pl 10 à 12 : « *Entwurf fur eine gewölbte Strassenbrücke über den Rhein bei Worms* » MM. Krone et Ebhardt).

10. — Projet récemment approuvé d'un pont en béton à Villeneuve-sur-Lot (Chemins de fer départementaux de Lot-et-Garonne) : 2 arcs jumeaux en béton, larges de 3^{m}, espacés de $4^{m}90$; portée 98^{m} ; montée $15^{m}39$; épaisseur à la clef, $1^{m}45$, aux retombées, $3^{m}30$.
(Projet : M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées. Exécution : MM. F. Mercier et Limousin, Entrepreneurs).

11. — Un des projets du pont sur le Neckar à Mannheim, étudié par M. Probst, présenté par la maison Grün et Bilfinger (1901), comportait une arche de 113^{m} entre deux de 60^{m}, toutes trois très surbaissées, à 3 articulations. — Joli et hardi projet, primé, non exécuté.
Pour le pont exécuté (1905-08), voir IV, p. 206.

12. — Pour le viaduc de la Sitter (ligne du lac de Zurich au lac de Constance), M. Acatos avait proposé, au lieu de la travée métallique de 120^{m} exécutée, une arche en maçonnerie, inarticulée, en anse de panier surhaussée : Portée, $121^{m}35$; montee, $64^{m}99$; rayons, au cerveau $54^{m}265$, aux reins, $66^{m}421$; épaisseurs, à la clef 2^{m}, aux retombées (à $40^{m}94$ sous la clef), $4^{m}58$.
(Dessins gracieusement remis par M. Acatos).

13. — On vient de commencer les fondations d'une voûte en béton de 173^{m} de portée (Pont du Bernand, Loire, ligne d'intérêt local de Balbigny à Régny), surbaissement environ 1/6,5, épaisseur à la clef, $2^{m}10$.
Projet : M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées. Exécution : MM. F. Mercier, Président du Conseil d'Administration des Chemins de fer du Centre, et Limousin, Entrepreneurs.

Dans une très grande voûte, on fera travailler les matériaux jusqu'au quart de leur charge de rupture. [14]

On y abaissera les pressions en donnant du fruit aux têtes, en ajourant largement les tympans, en employant pour les parties qui travaillent peu [15] des matériaux légers [16], par exemple de la brique.

Il y faut de bonnes pierres, de bon mortier, des appuis qui ne reculent pas, qui ne s'enfoncent pas.

En coupant les rouleaux en tronçons, en matant au refus les joints vides, en laissant longtemps la voûte sur cintre, on prévient les fissures sur cintre et au décintrement.

Une grande voûte ne coûtera pas très cher si on sait se défendre des recherches d'appareil qu'entraîne trop naturellement un grand ouvrage. Si on emploie de petits matériaux, une petite installation suffira ; si on construit par rouleaux, les cintres seront légers.

Elle sera vite faite, si on y occupe autant d'équipes de maçons que le cintre a de vaux.

Pendant la construction, l'Ingénieur vivra sur la voûte et ne s'en remettra à personne, — je dis, à personne, — de la surveillance aux moments et aux points critiques.

14. — V, p. 20. 15. — V, p. 49, renvoi 3. 16. — V, p. 49, renvoi 2.

TITRE IV

PROGRÈS DES GRANDES VOÛTES DEPUIS 1880

§ 1. — *AUGMENTATION DES PORTÉES ; AUGMENTATION DU NOMBRE, DU SURBAISSEMENT, DU RAYON DE COURBURE AU CERVEAU DES VOÛTES DE 40^m ET PLUS*

Art. 1. — Augmentation des portées.

Voûtes — Voie portée — Intrados			Plus grande portée en 1880 — Portée	1880 — Pont	1880 — Tome, page	1913 — Portée	1913 — Pont	1913 — Tome, page	Augmentation de la plus grande portée
inarticulées	sous route	Pleins cintres	m 45.45	Céret	I, 15	m 45.72	Connecticut Av^e	I, 67	m 0.27
		Ellipses	55	Diable	I, 116	55	Diable	I, 116	0
		Arcs peu surbaissés	49.20	Tournon	II, 35	85.34	Rocky River	II, 95	36.14
		Arcs assez surbaissés	60.96	Chester	III, 29	90	Plauen	III, 52	29.04
		Arcs très surbaissés	45	Mosca	III, 199	52	Neuhammer	III, 211	7
	sous conduite d'eau	Ellipses	40	Pont-sur-Yonne	I, 213	40	Pont-sur-Yonne	I, 213	0
		arcs assez surbaissés	67.10	Cabin-John	III, 75	67.10	Cabin-John	III, 75	0
		arcs très surbaissés	*Pas de voûte de 40^m ou plus*			40	Weisenbach	III, 219	»
	sous chemin de fer	Plein cintres	55.17	Ballochmyle	I, 41	55.17	Ballochmyle	I, 41	0
		Ellipses surbaissées	40	Signac	I, 131	42.67	Big Muddy River	I, 225	2.67
		Ellipses surhaussées	*Pas de voûte de 40^m ou plus*			55	Wiesen	I, 235	»
		Arcs peu surbaissés	48.77	Victoria	II, 201	61.50	Lavaur	II, 135	12.73
		Arcs assez surbaissés	42	Calcio	III, 100	85	Salcano	III, 141	43
		Arcs très surbaissés	*Pas de voûte de 40^m ou plus*			42.67	Bellow-Falls	III, 225	»
semi-articulées	sous route		*Pas de voûtes articulées avant 1880*			*59*	*Munderkingen*	IV, 55	»
	sous ch^{in} de fer					*70*	*Morbegno*	IV, 65	»
articulées	sous route					*65.45*	*Wallstrasse*	IV, 143	»
	sous ch^{in} de fer					*64.50*	*Kempten*	IV, 115	»

Pas d'augmentation de portée, ou augmentation insignifiante, pour les pleins cintres, les ellipses surbaissées.

Art. 2. — Augmentation du nombre de voûtes de 40[m] et plus.

Voûtes : Voie portée — Intrados		Nombre d'ouvrages ayant des voûtes de 40m et plus: en 1880		en 1913		Augmentation		Nombre de voûtes de 40m et plus: en 1880		en 1913		Augmentation	
inarticulées, sous route	Pleins cintres	5	27	7	65	2	* 38	5	29	11	111	6	82
	Ellipses	10		17		7		12		27		15	
	Arcs peu[1] surbaissés	6		10		4		6		14		8	
	Arcs assez[1] surbaissés	5		12		7		5		12		7	
	Arcs très surbaissés	1		19		18		1		47		46	
inarticulées, sous conduite d'eau	Ellipses	1	2	1	3	0	1	1	2	1	3	0	1
	Arcs assez surbaissés	1		1		0		1		1		0	
	Arcs très surbaissés	»		1		1		»		1		1	
inarticulées, sous chemin de fer	Pleins cintres	2	11	5	52	3	41	6	15	9	61	3	46
	Ellipses surbaissées	1		3		2		1		5		4	
	Ellipses surhaussées	»		1		1		»		1		1	
	Arcs peu surbaissés	3		16		13		3		16		13	
	Arcs assez surbaissés	5		26		21		5		28		23	
	Arcs très surbaissés	»		1		1		»		2		2	
semi-articulées	sous route	*Pas de voûtes articulées avant 1880*		5	6		6	*Pas de voûtes articulées avant 1880*		6	7		7
	sous ch[in] de fer			1						1			
articulées	sous route			18	24		24			29	35		35
	sous ch[in] de fer			6						6			

* Ces quatre ouvrages sont à 2 anneaux.

Art. 3. — Augmentation du surbaissement des voûtes de 40[m] et plus.

Voûtes : Intrados — Voie portée		Plus grands surbaissements des voûtes de 40m et plus — en 1880: Surbaiss[t]	Pont	Tome page	en 1913: Surbaiss[t]	Pont	Tome page
inarticulées, en ellipse	sous route	1/5	Alma	I, 153	1/5.428	Edmondson Av[e]	I, 122
	sous ch[in] de fer	1/3.25	Signac	I, 131	1/4.667	Big Muddy River	I, 225
inarticulées, en arc	sous route	1/8.18	Mosca, à Turin	III, 199	1/9.52[2]	Ziegenhals	III, 208
	sous ch[in] de fer	1/4	Maretta	III, 93	1/7	Bellows-Falls	III, 225
semi-articulées	sous route	*Pas de voûtes articulées avant 1880*			1/10	*Munderkingen*	IV, 55
	sous ch[in] de fer				1/7	*Morbegno*	IV, 65
articulées	sous route				1/12	*Cornélius*	IV, 180
	sous ch[in] de fer				1/5.82	*Illerbeuren*	IV, 159

1. — On n'a pas compté la voûte détruite de Trezzo (III, p. 19), les voûtes écroulées de Vieille-Brioude (II, p. 15), du Saulnier (III, p. 40).

2. — Pour des portées de moins de 40m, il y a de plus grands surbaissements, aux vieux ponts de Nemours (1795-1804), de Saint-Dié sur la Meurthe (1804-1821), surbaissés à 1/15, 6 — 1/18.

M. de Dartein : « *Etudes sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIX[e] siècle* », volume II : *Ponts français du XVIII[e] siècle, — Centre de la France*, p. 245 à 259, Pl. 44 à 46 ; p. 261 à 270, Pl. 47 à 49.

Art. 4. — Augmentation du rayon de courbure de l'intrados au cerveau (voûtes de 40^{m} et plus).

Voûtes :		Intrados — Voie portée	Plus grand rayon de courbure — en 1880 — Rayon	en 1880 — Pont	en 1880 — Tome page	en 1913 — Rayon	en 1913 — Pont	en 1913 — Tome page
inarticulées	en ellipse	sous route	m 53.75	Alma	I, 153	m 69.28	Emp^r-François	I, 168
inarticulées	en ellipse	sous ch^in de fer	35.92	Signac	I, 131	49.78	BigMuddyRiver	I, 225
inarticulées	en arc	sous route	48.77	Mosca, à Turin[3]	III, 199	105	Plauen	III, 52
inarticulées	en arc	sous ch^in de fer	25	Maretta	III, 93	52.33	Salcano	III, 141
semi-articulées		sous route		*Pas de voûtes articulées avant 1880*		*69.70*	*Munderkingen*	IV, 55
semi-articulées		sous ch^in de fer				*74*	*Morbegno*	IV, 65
articulées		sous route				*90*	*Neckarhausen*	IV, 232
articulées		sous ch^in de fer				*48.25*	*Illerbeuren*	IV, 159

La voûte de Plauen a la plus grande portée, 90^{m}, et le plus grand rayon de courbure, 105^{m}.

§ 2. — *ONT FAIT PROGRESSER L'ART DES VOÛTES LES INGÉNIEURS QUI EN ONT CONSTRUIT BEAUCOUP*

On commence par copier, puis l'expérience rend hardi.

C'est à la fin de leur carrière, que de Saget[4], Garipuy[5], ont construit les beaux ponts de Lavaur[6] et de Gignac[7].

Le pont de Neuilly est le 4e pont de Perronet; le pont de la Concorde, son 10e et dernier[8].

Le pont de Gloucester est le 11e pont en maçonnerie, la 35e voûte de Telford[9].

De 1843 à 1871, Morandière a exécuté 71 grands ouvrages, ayant ensemble 509 arches[10]. C'est après 20 ans de travaux qu'il a construit les voûtes de Chalonnes et de Nantes (ellipses de 30^{m}) ; son plus grand viaduc, celui de Pompadour (1873-75), est son dernier[11].

Les progrès faits depuis 30 ans par l'Allemagne et par l'Autriche, on les a attribués à un calcul plus exact des efforts. N'est-ce pas, plus simplement, parce que leurs grandes voûtes ont été faites par un petit nombre d'Ingénieurs[12] ?

3. — Le rayon de l'arche d'essai de Souppes (1868) était 85m496 (III, p. 375).

4. — De Dartein : « *Etudes sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIXe siècle* », vol. III : *Ponts français du XVIIIe siècle, — Languedoc*, p. 15 et 16.

5. — . . . . id. . . . p. 12 à 14.   6. — I, p. 97.   7. — I, p. 103.

8. — Loc. cit. renvoi 4, vol. II, *Centre de la France*, p. 9 et 10.

9. — Life of Thomas Telford (mort en 1834), Londres 1838.

10. — Morandière : « *Construction des Ponts* », préface, p. VI, VII.

11. — Ligne de Limoges à Brive. — Rapport sur la Construction, M. Dupuy, Ingénieur en chef.

12. — Sur les 49 ponts d'Allemagne qui ont des voûtes de 40^{m} et plus, 6 ont été projetés par le Président Leibbrand, 5 par M. Beutel ; les entreprises Liebold et Cie de Langebrück et d'Holzminden en ont projeté et construit 13 : l'Entreprise Sager et Wœrner de Munich, 7.
Sur les 13 ponts d'Autriche qui ont des voûtes de 40^{m} et plus, 11 ont été construits par la Direction des Chemins de fer de l'Etat.

§ 3. — *PART DE LA FRANCE*

Récapitulons les progrès depuis quelque 35 ans.

Tous sont français [13].

Articuler les voûtes, Dupuit l'avait proposé dès 1871 [14].

Partout où il y a une fissure à craindre, couper les rouleaux en tronçons et les claver au mortier sec, — méthode française [15, 16].

Construire les ponts larges sur deux minces anneaux de tête, — méthode française.

Au XVIIIe siècle, les Ingénieurs de France ont enseigné au monde l'art des ponts [17] : de ces maîtres, nous n'avons pas dégénéré.

Provisoirement, la France n'a plus la plus grande des grandes voûtes : mais elle a les plus belles, les plus diverses : c'est elle qui en a le plus.

Elle a gardé son rang : le premier.

Paris, 29 Juin 1914.

13. — « *Der Bau kühner Steinbrücken mit grossen Spannweiten und beträchtlicher Inanspruch-* « *nahme des Materials kommt angeregt durch wohlgelungene französische Bauwerke solcher Art — auch* « *in Deutschland allmählig in Aufnahme. . . .* »

« *La construction de ponts hardis en maçonnerie de grande portée dans lesquels on fait beaucoup* « *travailler les matériaux, stimulée par le succès d'ouvrages français semblables, devient peu à peu en* « *faveur en Allemagne. . . .* »

Zeitschrift fur Bauwesen, 1888, p. 235 à 259 : « *Steinbrucken mit gelenkartigen Einlagen* », Leibbrand Kgl. Ober-Baurath, — Stuttgart, novembre 1887, p. 235.

14. — Tome IV, p. 26. 15. — Voir p. 163, art. 3, renvoi 44. 16. — Voir p. 163, art. 3, renvoi 45.

17. — « *E che dire delle opere pubbliche, e specialmente dei ponti? Mentre le arcate dei ponti in* « *muratura dell' epoca romana avevano una luce che raramente sorpassava i 25 metri*, la Francia che fin* « *dall' epoca del Perronet (1760), è stata maestra in fatto di costruzioni di tal genere, ha costruito negli* « *ultimi tempi dei ponti in muratura come il ponte Lavaur, il ponte Castelet, il ponte Antoinette, il ponte* « *sulla Petrusse nel Lussemburgo ed altri, nei quali ad un'arditezza straordinaria è congiunta un'ammi-* « *revole eleganza di forme* ».

C. Guidi : « *I progressi della scienza e dell'arte del costruire* », — Discorso inaugurale del 1° anno scolastico 1906-07 del R. Politecnico di Torino, p. 19 et 20.

* La voûte sphérique du Panthéon d'Agrippa a 43^m^ de diamètre (Raynaud — *Art de bâtir*, p. 364), le dôme de Saint-Pierre 42^m^60 (Raynaud, *Edifices*, p. 398).

TABLE DES MATIÈRES
DU TOME V

3ME PARTIE. — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE COMMUN À TOUTES LES VOÛTES

TITRE I. — GRANDES VOÛTES EN PIERRE
MATÉRIAUX. — APPAREIL. — TRAVAIL *(Suite)*

CHAPITRE III. — MATÉRIAUX

CHAPITRE IV. — DISPOSITION DES MATÉRIAUX. — APPAREIL

TITRE I. — GRANDES VOÛTES EN PIERRE
MATÉRIAUX. — APPAREIL. — TRAVAIL *(Suite)*

CHAPITRE V. — TRAVAIL

TITRE II. — VOÛTES EN BÉTON

TITRE II. — VOÛTES EN BÉTON *(Suite)*

TITRE III. — FRUIT DES TÊTES

TITRE IV. — PILES

CHAPITRE I. — DIMENSIONS ET DISPOSITIONS

TITRE IV. — PILES *(Suite)*

TITRE V. — CULÉES

CHAPITRE I. — COMMENT ON CALCULE LEURS DIMENSIONS

CHAPITRE II. — DISPOSITIONS DES CULÉES

CHAPITRE III. — MATÉRIAUX. — APPAREIL

TITRE VI. — VOLUME ENTRE LES GRANDES VOÛTES ET LA VOIE PORTÉE

CHAPITRE I. — VOLUME PLEIN

TITRE VI. — VOLUME ENTRE LES GRANDES VOÛTES ET LA VOIE PORTÉE *(Suite)*

CHAPITRE II. — AU-DESSUS DE QUELLES VOÛTES A-T-ON ÉVIDÉ, ET COMMENT ?

TITRE VII. — COMMENT ON RÉDUIT LA LARGEUR DES VOÛTES ENTRE TÊTES

UN SEUL ANNEAU AVEC TROTTOIRS EN ENCORBELLEMENT PLANCHER SUR DEUX ANNEAUX MINCES

CHAPITRE I. — POUR ÉPUISER LA RÉSISTANCE DES VOÛTES, IL FAUT EN RÉDUIRE LA LARGEUR

CHAPITRE II. — UN SEUL ANNEAU AVEC TROTTOIRS EN ENCORBELLEMENT

CHAPITRE III. — VOIE LARGE SUR DEUX ANNEAUX MINCES PORTANT UN PLANCHER

TITRE VIII. — PONT BIAIS

CHAPITRE I. — VOÛTES BIAISES

CHAPITRE II. — VOÛTES DROITES DONT L'AXE EST OBLIQUE SUR LA RIVIÈRE OU LA VOIE TRAVERSÉE

CHAPITRE III. — VOÛTES DROITES, NON EN BERCEAU, SUR PILES RONDES

CHAPITRE IV. — PONTS EN DEUX ANNEAUX

TITRE XI. — COMMENT ON AJUSTE L'OUVRAGE AU TERRAIN *(Suite)*

CHAPITRE II. — OÙ ET POURQUOI ON A FAIT DES PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

CHAPITRE III. — CHOIX DE L'INTRADOS

TITRE XII. — QUELQUES RÉFLEXIONS SUR L'ARCHITECTURE DES PONTS

CHAPITRE I. — ENSEMBLE DE L'OUVRAGE

TITRE XII. — QUELQUES RÉFLEXIONS SUR L'ARCHITECTURE DES PONTS *(Suite)*

TITRE XIV. — DÉCORATION DES PONTS *(Suite)*

TITRE XIV. — DÉCORATION DES PONTS (*Suite*)

CHAPITRE V. — CULÉES. — ABORDS

LIVRE II. — COMMENT ON EXÉCUTE UN PONT EN MAÇONNERIE FONDATIONS — CINTRES — VOÛTES

TITRE I. — FONDATIONS

TITRE II. — CINTRES

CHAPITRE I. — GÉNÉRALITÉS

TITRE II. — CINTRES *(Suite)*

CHAPITRE II. — CINTRES FIXES

C'EST-A-DIRE BIEN APPUYÉS SUR LE SOL ENTRE LES NAISSANCES

TITRE II. — CINTRES *(Suite)*

CHAPITRE III. — CINTRES COMPLÈTEMENT RETROUSSÉS C'EST-A-DIRE NE S'APPUYANT QU'AUX NAISSANCES OU TOUT PRÈS DES NAISSANCES

CHAPITRE IV. — SUPÉRIORITÉ DES CINTRES A RAYONS (ÉVENTAIL) ET COMME CINTRES FIXES ET COMME CINTRES RETROUSSÉS.......... 150

TITRE II. — CINTRES *(Suite)*

TITRE II. — CINTRES *(Suite)*

CHAPITRE IX. — POUR UN PONT A *n* ARCHES, COMBIEN DE CINTRES ?

TITRE III. — COMMENT ON EXÉCUTE LES GRANDES VOÛTES EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE

CHAPITRE I. — ROULEAUX

CHAPITRE II. — TRONÇONS ET CLAVAGES

ON COUPE LES ROULEAUX EN TRANCHES PAR DES JOINTS VIDES PERMETTANT A LA VOÛTE DE SUIVRE, SANS CASSURES, LES MOUVEMENTS DU CINTRE ; PUIS, ON MATE CES JOINTS

TITRE III. — COMMENT ON EXÉCUTE LES GRANDES VOÛTES EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE *(Suite)*

TITRE IV. — DÉCINTREMENT *(Suite)*

TITRE V. — ÉPREUVES DES VOÛTES EN MAÇONNERIE

TITRE VI. — MOUVEMENTS ET FISSURES DUS AUX CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE NÉCESSITÉ DE S'EN PRÉOCCUPER POUR LES GRANDES VOÛTES JOINTS DE DILATATION

LIVRE III. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS?

GRANDES VOÛTES

CLASSEMENT PAR PAYS

PLUS GRANDE VOÛTE A CHAQUE ÉPOQUE

PROGRÈS. — PART DE LA FRANCE

TITRE I. — PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS?

TITRE I. — PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS? *(Suite)*

ERRATA DU TOME V

Page 34 : au lieu de : ϕ_5 — **amont**..., lire : ϕ_5 — **aval**... et au lieu de : ϕ_6 — **aval**..., lire : ϕ_6 — **amont**...

Page 103, dans le titre de la photographie : au lieu de :... (**Pont Ælins**)..., lire :... (**Pont Ælius**)...

GRANDES VOÛTES

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME VI — APPENDICE

PRATIQUE DES VOÛTES

I^RE^ PARTIE

INSTRUCTIONS POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

2ME PARTIE

CALCULS ET ÉPURES

3ME PARTIE

TABLES NUMÉRIQUES

ANNEXES

BOURGES

IMPRIMERIE V^VE^ TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15

—

1916

POUR RELIER, CONSULTER, CONSERVER L'OUVRAGE, voir p. 283

APPENDICE

PRATIQUE DES VOÛTES

I^RE PARTIE

INSTRUCTIONS POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

2ME PARTIE

CALCULS ET ÉPURES

3ME PARTIE

TABLES NUMÉRIQUES

1re PARTIE

INSTRUCTIONS

POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

LIVRE I

OUVRAGES DE 8m D'OUVERTURE

ET AU-DESSOUS

LIVRE II

VIADUCS

LIVRE I

OUVRAGES

DE 8^M D'OUVERTURE ET AU-DESSOUS

TITRE I

PROJETS D'EXÉCUTION

CHAPITRE I

DÉBOUCHÉS

Art. 1. — Difficulté de fixer les débouchés des petits ouvrages.

Il est fort important, — mais fort difficile, — de déterminer le débouché des petits ouvrages. On a pour eux beaucoup moins de renseignements que pour les grands : les circonstances locales y comptent beaucoup plus.

Il n'y a de sûr que la comparaison avec les ouvrages voisins, reconnus, après examen attentif, suffisants sans exagération d'ouverture. On relèvera donc, avec le plus grand soin, leurs débouchés[1] linéaire et superficiel, leur revanche, leur remous, etc...

Art. 2. — Nécessité de réduire les débouchés à juste ce qu'il faut.

En l'absence de renseignements précis, ou à défaut d'ouvrages voisins, on a généralement exagéré les débouchés des petits ouvrages. Or, ils sont très nombreux : leur coût augmente très vite avec leur ouverture et leur longueur. Il faut donc ne faire pour eux que ce qui est strictement nécessaire.

Pour les petits ponts métalliques, au contraire, on peut augmenter un peu la portée sans bien grande dépense.

Sous la condition essentielle qu'il y ait une revanche suffisante sous la clef ou sous les poutres, un pont trop étroit suffit à débiter les eaux des crues s'il est bien fondé, si les terrassements et les quarts de cône aux abords n'ont rien à craindre, et si la vitesse sous l'ouvrage ne peut pas affouiller le terrain, au cas où il n'y aurait pas de radier.

Un ouvrage sous charge de remblai peut même être aveuglé sans inconvénient sérieux : le remous à l'amont forme une charge qui augmente le débit et compense l'insuffisance du débouché ; mais il faut être absolument sûr des fondations ; il faut que les parafouilles, ou les murs, s'il n'y a pas de radier, soient bien encastrés dans un terrain solide en contre-bas des affouillements possibles.

La revanche sous la clef ou sous les poutres est un élément encore plus important à déterminer que le débouché. Il y a beaucoup d'ouvrages qui sont insuffisants, malgré une ouverture exagérée, parce qu'ils n'ont pas assez de revanche.

Sur des torrents à largeur démesurée, il conviendra souvent de réduire l'ouverture, non seulement par économie, mais pour que les eaux fassent chasse sous l'ouvrage ; avec trop de débouché, le lit s'élève, et un ouvrage d'ouverture exagérée devient insuffisant.

Art. 3. — Méthodes approchées pour fixer les débouchés.

En l'absence d'ouvrages existants voisins, voici différentes méthodes qui permettent une première approximation : elle suffit quelquefois.

1. On reconnaîtra en comparant ces renseignements que, pour beaucoup, les débouchés ont été pris au hasard.

A. — Débouché en fonction du débit du cours d'eau.

On calcule le débit de l'ouvrage à l'aide de la table T_1 (APPENDICE, — 3e partie). On s'assure qu'il est à peu près le même que celui du cours d'eau, lequel s'évalue comme suit :

Lorsque, sur une certaine longueur, le lit est à peu près régulier et qu'on connait bien la hauteur des plus hautes eaux, on lève, en différents points bien choisis, la section et le périmètre mouillés par les hautes eaux, et on calcule le débit à l'aide de la table T_1.

B. — Débouché en fonction de la longueur du cours d'eau.

Pour les petits ouvrages établis sur des cours d'eau qui ne dépassent pas 5 ou 6k, on peut admettre sans bien grande erreur que, dans la même région, les ouvertures sont proportionnelles aux longueurs des cours d'eau. Des ouvrages existants, on déduira facilement le coefficient de proportionnalité [2].

Dans une étude d'avant-projet, et comme première approximation, on pourra sans grande erreur adopter 1m d'ouverture par km. de développement de la branche principale du cours d'eau, soit :

0m60 pour de simples dépressions de moins de 250m [3] ;
0m70 pour des dépressions de 250 à 500m ;
1m00 pour des dépressions de 500m à 1km ;
1m50 pour des dépressions de 1km à 1km500, etc...

On mesure la longueur sur le plan ou sur la carte, ou à défaut au pas.

On augmente le débouché pour les ravins qui charrient ; on le diminue pour les ouvrages sous charge.

C. — Débouché en fonction de la surface du bassin versant.

J'ai fait relever, pour plusieurs centaines d'ouvrages, les ouvertures, bassins, pentes, etc... Il est à peu près impossible d'en dégager une loi, même par régions bien définies. On a toutefois le sentiment, en établissant des graphiques, que, dans la même région et pour de petits bassins, les ouvertures sont proportionnelles à la racine carrée du bassin versant.

Soient : $2a$ l'ouverture en mètres, S la surface du bassin versant en hectares. On peut admettre comme première approximation :

Pour un bassin de :	$2a$ =
4 hectares et au-dessous	0m60.
4 à 400 hectares	$0^m30 + 0,16\sqrt{S}$.
plus de 400 hectares et jusqu'à 30.000	$0,17\sqrt{S}$.

Voici, d'après ces formules, les valeurs de $2a$ pour S de 0 à 7.000 hectares :

Surface du bassin en hectares S	Ouverture $2a$	Surface du bassin en hectares S	Ouverture $2a$	Surface du bassin en hectares S	Ouverture $2a$
4h	0m 60	424h	3m 50	1.695h	7m 00
7	0 70	554	4 00	1.946	7 50
19	1 00	701	4 50	2.214	8 00
56	1 50	865	5 00	2.803	9 00
113	2 00	1.047	5 50	3.460	10 00
173	2 50	1.247	6 00	4.982	12 00
285	3 00	1.462	6 50	6.782	14 00

2. En Andalousie, pour les cours d'eau torrentiels (Ramblas), lesquels n'ont d'eau qu'à la suite d'orages, nous admettions de 1 mètre à 1m20 d'ouverture par kilomètre de développement de la branche principale. On avait opéré de même à l'Ouest Algérien.

3. En principe, on place un aqueduc au fond de toutes les dépressions barrées par un remblai. On s'est quelquefois contenté, pour les toutes petites, d'un drain, d'un filtre : c'est une mauvaise pratique.

CHAPITRE II

LEVERS DE DÉTAIL AUX ABORDS DES OUVRAGES

Dans les limites qui intéressent l'ouvrage, on lèvera un plan spécial avec le nombre de cotes convenable.

Les plans levés aux abords des ouvrages doivent être dressés avec le procédé le plus pratique dans chaque cas ; ordinairement, avec une petite ligne de base et des profils en travers sur cette base ; exceptionnellement, dans les terrains difficiles, au tachéomètre.

Ils auront assez de cotes et s'étendront assez loin de chaque côté, surtout à l'amont, pour bien assurer l'entrée et la sortie des eaux, bien placer les têtes, bien orienter l'ouvrage.

C'est sur ces plans spéciaux qu'on lèvera le profil en long de l'ouvrage, puisque c'est sur eux qu'on arrêtera sa direction. Pour les ouvrages à faible pente, spécialement pour ceux d'irrigation, on vérifiera sur le terrain ce profil en long.

Sur le profil en long et sur les profils en travers des cours d'eau, on marquera, si on a pu l'avoir, la ligne des hautes eaux.

CHAPITRE III

HAUTEUR DES PIEDS-DROITS

§ 1. — *OUVRAGES SERVANT EXCLUSIVEMENT A L'ÉCOULEMENT DES EAUX*

Art. 1. — Revanche minima au-dessus des plus hautes eaux.

On règle la hauteur des pieds-droits sur celle des hautes eaux.

La revanche sera déterminée comme suit :

Pour les aqueducs de $0^{m}60$ et $0^{m}70$ établis sur des dépressions de moins de 500^{m}, une revanche de $0^{m}25$ est en général suffisante.

A des ponts sur de grands fleuves, on s'est contenté d'une revanche de moins de $2^{m}00$. On peut, sauf dans des cas tout-à-fait exceptionnels, fixer à $1^{m}50$ la revanche des ponts de $8^{m}00$ en plein cintre.

On fera varier la revanche d'une manière continue de $0^{m}25$ à $1^{m}50$ comme l'indique ce tableau :

Ouverture	Revanche minima	Ouverture	Revanche minima
$0^{m}60$	$0^{m}25$	$4^{m}00$	$1^{m}10$
0 70	0 25	5 00	1 20
1 00	0 35	6 00	1 30
2 00	0 60	7 00	1 40
3 00	0 80	8 00	1 50

Pour les voûtes surbaissées, on admettra les mêmes limites, avec cette deuxième condition que les hautes eaux ne dépasseront pas la ligne des naissances.

Il est bien entendu que ces revanches sont des minima, qu'on les augmentera s'il y a lieu, — par exemple, si le cours d'eau entraîne de gros blocs, charrie des arbres, etc., — dans les régions à pluies torrentielles, à sol nu et friable : il faut là, pour prévenir les obstructions, élever sensiblement les pieds-droits des ouvrages.

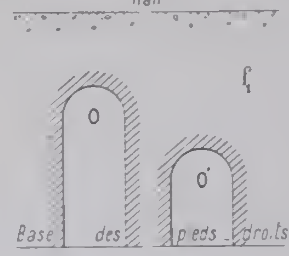
Les Agents qui débutent, cherchent, pour réduire les terrassements, à lécher de trop près le terrain naturel : on empêche ainsi les ouvrages de bien fonctionner, et on expose la plate-forme à être surmontée.

Art. 2. — Hauteur des pieds-droits des ouvrages en plein cintre.

A. — Minima : 0m55.

B. — Maxima : 1m00.

Pour visiter et curer un aqueduc, il faut une ouverture d'au moins 0m60 et, sous clef, une hauteur d'au moins 0m85, soit, pour un aqueduc de 0m60, une hauteur minima de pieds-droits de 0m55. Pour la plus grande ouverture d'un ouvrage courant, 8m, on ne peut accepter de poser sur le sol la ligne des naissances. J'adopterai la même limite de 0m55.



Soient deux ouvrages O et O' (f_1) de même ouverture, pour lesquels il y a même différence de cotes entre le rail et la base des pieds-droits ; O, plus haut et plus court, est (y compris murs en aile ou en retour) plus cher que O', plus bas et plus long.

Il convient donc de limiter strictement la hauteur des pieds-droits à ce qu'impose la revanche de la clef au-dessus des hautes eaux. Sauf cas très exceptionnels, 1m00 suffit.

C. — Entre les deux limites de 0m55 *et* 1m00.

Elle sera déterminée dans chaque cas, soit uniquement par la revanche au-dessus des eaux, soit si, bien que l'ouvrage soit fait pour écouler l'eau, on veut permettre — à titre exceptionnel — à un piéton d'y passer en se courbant.

On adoptera, pour chaque ouverture, 3 hauteurs types de pieds-droits : 0m55, 1m, et une hauteur intermédiaire.

§ 2. — *OUVRAGES SERVANT DE PASSAGE*

Art. 11 du Cahier des charges des grandes Compagnies : « *Lorsque le chemin de fer devra « passer au-dessus d'une route nationale ou départementale, ou d'un chemin vicinal, l'ouverture « du viaduc sera fixée par l'Administration, en tenant compte des circonstances locales ; mais « cette ouverture ne pourra, dans aucun cas, être inférieure à 8m pour une route nationale, « à 7m pour la route départementale, à 5m pour un chemin vicinal de grande communication, « et à 4m pour un simple chemin vicinal* [4].

« *Pour les viaducs de forme cintrée, la hauteur sous clef, à partir du sol de la route, sera « de 5m00 au moins. Pour ceux qui seront formés de poutres horizontales en bois ou en fer, « la hauteur sous poutre sera de 4m30 au moins...*

« *La hauteur des parapets sera fixée par l'Administration, et ne pourra, dans aucun cas, « être inférieure à 0m80* » [5].

Pour les chemins ruraux, en général peu importants, on pourra réduire l'ouverture des ouvrages à 3m et la hauteur sous clef à 3m50.

Enfin, dans les acquisitions de terrains, il a pu convenir d'accorder aux propriétaires des passages particuliers pour piétons et bestiaux, de 1m00 à 2m50 d'ouverture ; on ménagera sous clef des hauteurs variant de 2m à 2m75.

On ne dépassera pas 3m pour la hauteur des pieds-droits des ouvrages en plein cintre de 4m à 8m.

Les angles des culées des passages inférieurs doivent être en pierre dure. On les protègera contre le choc des roues des véhicules, par des trottoirs avec bordures, ou par des boute-roues.

4. Toutefois, sauf cas exceptionnels, l'ouverture des passages ne sera pas supérieure à la largeur fixée par l'arrêté de classement de la route ou du chemin

5. D'après une décision ministérielle du 31 août 1855, la hauteur des parapets en maçonnerie doit être portée à 1m50 pour les ponts placés à moins de 200m en avant, et moins de 150m en arrière du milieu des trottoirs des gares.

CHAPITRE IV

DISPOSITIONS DES OUVRAGES EN PLAN

Art. 1. — Direction, entrée, sortie des eaux.

J'appelle très spécialement l'attention sur la nécessité de bien placer les ouvrages. Il faut que la direction soit bien celle qui convient, et que les têtes soient placées où il faut. Dès qu'il y aura doute ou difficulté, les chefs de section devront faire indiquer devant eux, sur place, avec des jalons, l'emplacement des têtes. On peut relever, dans les lignes construites, quantité d'erreurs d'implantation [6] qui sautent aux yeux, et qu'un chef de section un peu soigneux eût évitées en « présentant » l'ouvrage.

Il faut surtout bien étudier sur place l'entrée des eaux, les bien entonner dans l'ouvrage. Si un fossé latéral amène beaucoup d'eau, on l'infléchira un peu avant d'arriver au cours d'eau.

Éviter en principe de dévier les cours d'eau, surtout les torrents. Si on les modifie, les modifier le moins possible : bien s'assurer qu'il n'y aura ni affouillement, ni dépôt, devant, sous, derrière l'ouvrage.

Une modification de cours d'eau impose souvent d'importants travaux de défense.

Dans certains torrents à large lit, il faut parfois prolonger les murs en aile, évasés par des guideaux en enrochements ou en blocs de béton, pour entonner les eaux sous le pont. Ce sont les courants obliques qui sont les plus dangereux.

Il faut enfin que les eaux sortent facilement, et aussi qu'elles ne ravinent pas les propriétés en aval du chemin de fer.

Art. 2. — Murs en aile ou murs en retour ?

A. — Choix à faire.

Les murs en aile [7] coûtent toujours un peu plus cher que les murs en retour [8], surtout pour les ouvrages à radier, du moins en apparence, quand on fait les métrés comparatifs ; mais les murs en retour comportent des gazonnements, souvent des perrés, qu'on ne peut pas évaluer d'avance.

Dans les ouvrages sur torrents, il faut non seulement défendre le pied des quarts de cône, mais quelquefois empêcher par des guideaux les eaux de se jeter sur les remblais et d'y faire brèche.

Pour les ouvrages sans radier, la différence de dépense est très peu importante ; pour les ouvrages à radier, elle peut être négligée pour les portées de 3^m et au-dessous.

S'il y a beaucoup à épuiser, s'il faut fonder sur pilotis, le mur en retour ramassé vaut mieux que de longues et étroites fondations de mur en aile.

Sauf ces cas, les murs en aile seront toujours adoptés :

1° pour tous les ouvrages sous charge de remblai, parce qu'ils résistent mieux à la poussée sur les têtes ;

2° pour tous les ouvrages sur cours d'eau, parce qu'ils assurent mieux l'entrée et la sortie des eaux, et qu'ils ne comportent pas d'ouvrages accessoires ; élever dans ce cas la murette de retour un peu au-dessus des hautes eaux :

3° pour tous les ouvrages sans radier.

En principe, on n'étudiera de murs en retour que pour les passages inférieurs ne rentrant pas dans les catégories précédentes, c'est-à-dire ceux fondés sur radier général et sans surcharge, ceux où le tracé des chemins imposerait des murs en aile trop évasés ou des murettes trop hautes.

6. Par exemple : un ponceau débouchant en face d'une paroi de rocher — ou trop biais sur le lit à chaque tête....

7. Dits quelquefois en prolongement des pieds-droits.

8. Dits quelquefois en prolongement des têtes.

B. — Évasement des murs en aile.

Sauf exception motivée, pour les ouvrages de 0^m60 à 1^m00, les murs en aile seront établis sans évasement, en prolongement des pieds-droits.

Les ouvrages de plus de 1^m seront évasés suivant ce que les lieux demandent (entrée des eaux, raccordement avec les chemins latéraux, etc.).

Quand l'évasement ne sera pas motivé, le supprimer.

On pourra le supprimer à l'aval, tout en l'admettant à l'amont.

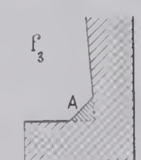
En pratique, l'évasement varie de 1/10 à 1/5.

Les murs en aile (f_2) seront, soit rectilignes (il y aura alors une arête en *a*), soit suivant une courbe tangente en *b* aux pieds-droits.

Aux ouvrages de lignes à 1 voie que l'on prévoit devoir être mises à 2 voies, il peut être prudent de ne faire commencer l'évasement qu'au delà de la place de cette seconde voie.

C. — Remblais derrière les murs et murettes de retour.

Faire ces remblais en graviers ou en matériaux non décomposables par l'humidité ou la gelée ; exclure les terres argileuses, le gypse, etc.



Les murettes de retour s'ouvrent quelquefois en A (f_3) par l'effet du tassement des remblais : ne pas les faire trop longues, et renforcer l'angle rentrant A.

CHAPITRE V

PENTE DES OUVRAGES SUR COURS D'EAU

Sauf ceux pour irrigation qui écoulent des eaux claires et qui sont sur des canaux à faible pente, les ouvrages pour l'écoulement des eaux doivent avoir au moins 0,02 de pente.

Il faut donner aux ouvrages le plus de pente qu'on peut.

Il vaut bien mieux augmenter la pente qui ne coûte rien, que l'ouverture qui coûte cher.

Plus l'ouvrage est petit, plus il est long, plus il faut forcer la pente pour augmenter le débit et prévenir les dépôts.

Un ouvrage peut avoir plusieurs pentes, à condition que la plus petite soit encore suffisante et qu'elles soient bien raccordées.

A la sortie de l'ouvrage, avoir une pente telle que les matériaux entraînés ne s'y déposent pas ; il suffira parfois de creuser un peu plus en aval qu'en amont la dérivation ou le lit.

Bien éviter les réductions de pente à l'amont et sous l'ouvrage par rapport au lit d'amont : elles diminueraient la vitesse et provoqueraient des dépôts.

Un ouvrage bien fondé peut avoir une inclinaison allant jusqu'à 1/1 [9]. Au-delà de 30/100, on rejointoyera au ciment le bas des pieds-droits et le radier ; avec de pareilles pentes, on n'a jamais à débiter beaucoup d'eau.

9. Exemples d'ouvrages en forte pente :

Lignes de :	Ouverture	Pente	Charge de remblai sur la voûte
Rodez à Millau	2^m50	0 168	»
Mende à La Bastide	1 00	0 200	0^m50
Brioude à Saint-Flour	0 70	0 37	2 90
	1 00	0 335	6 70
Morez à Saint-Claude	0 70	0 58	9 20
	2 00	0 71	3 60
Frasne à Vallorbe	0 70	0 39	1 80
	1 00	0 36	6 40

Sous aucun prétexte, on ne fera d'ouvrages à chutes, sauf quand le rocher en forme naturellement. Les ouvrages à chutes sont très chers, cassent facilement [10].

Dans certains cas exceptionnels, on acceptera un mur de chute, mais seulement à la tête aval, en dehors de la voûte : on protégera le pied de la chute par des dalles ou des enrochements.

Dans les terrains friables à forte pente, on coupera les ravins à l'amont par une série de petits barrages à pierres sèches, comme en fait le Service des Forêts.

Quand la pente dépassera 30 0/0, on retournera horizontalement la tête aval, afin de supprimer les angles aigus du bandeau.

On a quelquefois disposé la tête amont perpendiculairement à la pente : c'est laid.

CHAPITRE VI

DES DIFFÉRENTS TYPES D'OUVRAGES

§ I. — *DALOTS* [11]

Art. 1. — Sous rails.

Bien qu'on en ait fait beaucoup, il faut éviter les dalots sous le chemin de fer, parce que les dalles peuvent casser brusquement [12].

Les dalots sous rails doivent avoir au moins $0^{m}60$, au plus $0^{m}80$ de portée, une hauteur sous dalles d'au moins $0^{m}85$.

On a fait des dalots avec des dalles directement sous ballast, d'autres sous charge de 4 à 5^{m}. Il conviendra de ménager sous ballast un matelas de $0^{m}30$ au moins, $0^{m}40$ si c'est possible.

On acceptera les dalots sous rails à l'entrée des souterrains, quand il s'agira de faire passer un fossé ou les deux fossés de la voie dans l'aqueduc du souterrain. Dans ce cas, la dalle est directement sous le ballast, et la portée est réduite à $0^{m}40$, à $0^{m}50$.

Les dalots sous rails ne seront pas couronnés au niveau du rail, ni même au niveau de la plate-forme; on appareillera en crossette la dalle de tête, comme pour un ouvrage sous charge.

Art. 2. — Hors la voie.

Pour ceux-là, pas d'ouverture minima ; on pourra descendre à $0^{m}40$ et même $0^{m}30$.

§ 2. — *BUSES*

Art. 1. — Buses en ciment.

A. — Sous rails.

Les buses en ciment ont été souvent employées sous rails [13]. Elles sont trois fois moins chères que les aqueducs de même ouverture.

Comme leurs parois sont plus lisses, à égalité de section et de pente, elles débitent plus. (Voir plus loin la table T_1.)

Elles sont ordinairement moins chères que les dalots ; mais, comme eux, exposées à casser.

Il est prudent de ne les accepter que dans des cas tout à fait exceptionnels, et de préférence pour écouler des eaux claires (irrigations, sources).

Pour éviter des ruptures, on ménagera toujours, entre le dessous du ballast et le dessus de la buse, un matelas aussi épais que possible, jamais moins de $0^{m}50$.

On n'emploiera pas de tuyaux achetés tout faits.

Les buses seront toujours faites, en place, autour d'un moule dont la surface est la douelle de la buse.

10. Il y en a eu beaucoup de cassés entre Millau et Séverac.

11. On a écrit dalots et non dallots, d'après Littré.

12. On pourrait, toutefois, les admettre dans certaines régions où l'on trouve des dalles d'un schiste très résistant et élastique (par exemple à Lourdes).

13. Sous la ligne de Marvejols à Neussargues, il y a 1.023^{m} de buses de $0^{m}70$. J'en ai construit beaucoup : en Espagne, et sous de très grands remblais ; — sous les lignes de Mende à La Bastide, de Brioude à Saint-Flour (42 buses — charge maxima de remblai : 4^{m}). Il n'y a jamais eu d'accidents ni d'inconvénients pour l'écoulement des eaux, même sales, à condition que la buse eût une pente d'au moins 0,02.

On ne tolèrera que très exceptionnellement qu'elles soient faites par tuyaux pilonnés verticalement à côté de l'ouvrage : les joints en seront fermés par un bourrelet en béton (500k de ciment pour 1mc de sable et « graville »).

Le diamètre sera d'au moins 0m60, d'au plus 0m80 : au-delà, il devient difficile de bien faire une buse en ciment non armé.

B. — Hors la voie.

Hors la voie, la rupture d'une buse est plus rare et moins grave. On ménagera un matelas de 0m30 au moins entre le chemin et le dessus de la buse.

Pas de minimum d'ouverture prescrit ; on ne descendra pas toutefois au-dessous de 0m30.

Les buses sous et hors la voie seront enveloppées de terre pilonnée sur 0m30 au moins.

Art. 2. — Buses en fonte pour irrigations.

Pour les eaux d'irrigation, on peut aussi employer des buses en fonte.

Il convient de les établir en déblai sous une certaine charge de plate-forme. Avoir soin de ménager, à l'amont, un petit puisard pour décanter les eaux, et de tenir l'entrée de la buse à 0m15 au-dessus du fond du puisard.

La pente de ces buses peut être abaissée à 0,002.

Elles sont en général plus chères que les buses en ciment de même section : pour leurs joints (à emboîtement et cordon), il faut des ouvriers spéciaux.

On ne les emploiera donc que pour les diamètres inférieurs à 0m30, limite au-dessous de laquelle il n'est pas pratique de faire, sur les chantiers, des buses en béton de ciment.

§ 3. — *CHOIX, POUR LES PETITS OUVRAGES HORS LA VOIE, ENTRE L'OUVRAGE VOÛTÉ, LE DALOT ET LA BUSE.*

En général, l'aqueduc voûté est beaucoup plus cher que le dalot, et celui-ci, un peu plus cher que la buse.

Sauf exceptions motivées, employer le dalot pour les ouvertures de moins de 0m30. Pour celles de 0m30 inclus à 0m80 inclus, employer toujours la buse en ciment ou le dalot : on choisira d'après le prix.

0m80 est la limite d'ouverture des buses en ciment (en ciment non armé).

Pour les dalots, la limite est celle que donnent les matériaux du pays.

On ne dépassera pas en général 0m80, ce qui exige des dalles de 1m10 à 1m20.

S'il s'agit de canaux d'irrigation, préférer toujours en principe la buse en ciment, qui à égalité de section débite plus, ou la buse en fonte pour les diamètres inférieurs à 0m30.

§ 4. — *SIPHONS SOUS RAILS*

On les évitera, parce qu'ils sont difficiles à entretenir, et qu'ils donnent lieu à des difficultés avec les intéressés.

Il ne faut pas non plus en avoir une peur exagérée : ils fonctionnent bien lorsque les eaux sont claires et bien décantées par des puisards.

Les tuyaux de siphons seront en fonte ou en béton de ciment, ou même en maçonnerie, suivant leur ouverture et la charge d'eau.

Quand on a beaucoup d'eau à débiter, il vaut mieux accoler deux tuyaux qu'établir un seul tuyau d'un grand diamètre, parce qu'on a toujours intérêt à réduire la hauteur et que, d'autre part, en cas d'accident ou d'obstruction, il y a chance qu'un tuyau sur deux fonctionne.

§ 5. — *BÂCHES EN TÔLE OU EN BÉTON ARMÉ*

Quand une rigole d'irrigation est coupée à plus de 4m80 au-dessus du rail, on examinera si, au lieu de la faire siphonner, il n'y aurait pas avantage à la faire passer par dessus le rail dans une bâche.

§ 6. — *OUVRAGES SOUS CHARGE DE REMBLAI*

Art. 1. — Les adopter en principe.

Un ouvrage sous charge coûte toujours moins cher qu'un ouvrage couronné au niveau de la plate-forme [14]. On ne cherchera donc pas à augmenter la hauteur des pieds-droits, sauf pour

14. Voir plus haut p. 10.

ceux sur cours d'eau, quand il y a intérêt à augmenter le débouché, et lorsqu'il y aurait peu à augmenter la hauteur, pour atteindre le niveau de la plate-forme.

Art. 2. — Ouvrages en ellipse surhaussée.

Pour les ouvertures de 2^m et au-dessus, sous charge de remblai de plus de 5^m, on pourra adopter, si l'économie en vaut la peine, des ouvrages en ellipse surhaussée [15].

f_4

Il n'y aura que 2 types (f_4) :

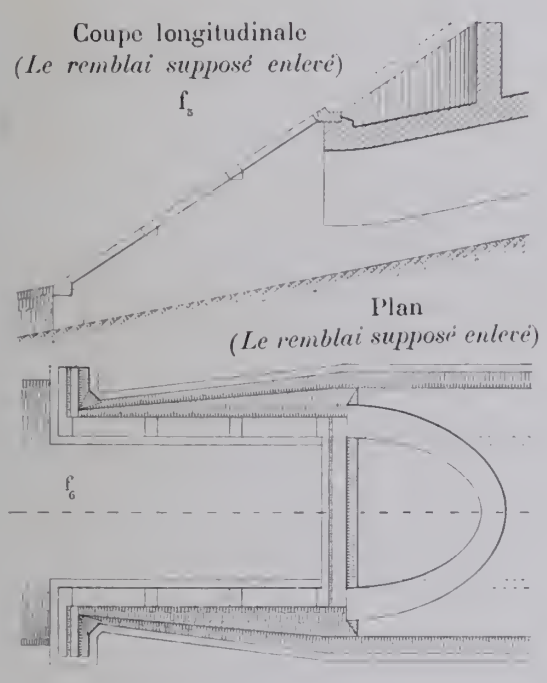
$$b = 1{,}5\ a \qquad \frac{b}{2a} = \frac{3}{4} = 0{,}75 \quad \text{(Type 1).}$$

$$b = 2\ a \qquad \frac{b}{2a} = 1 \quad \text{(Type 2).}$$

Pour la même hauteur sous clef, l'ellipse surhaussée cube moins de maçonnerie que le plein-cintre sur pieds-droits.

On adoptera le type 1, moins cher, quand sa revanche suffira.

Art. 3. — Voûtes à axe vertical reportant sur les murs en aile la poussée du remblai.



Sous un haut remblai, et surtout si l'ouvrage est en très forte pente, on peut craindre que la tête la plus basse se détache du corps.

Pour reporter la poussée sur les murs en aile, on a quelquefois [16] établi, à la tête la plus basse, une voûte à axe vertical en plein cintre ; elle serait, plus utilement, en ellipse surhaussée ou en ogive (f_5-f_6).

Ce dispositif ne sera pas appliqué sous charge de remblai de moins de 5^m.

Exemples :

15

Lignes de :	Ouverture	Charge de remblai sur la voûte
Mende à Sévérac	2^m 00	25^m 00
Linarès à Alméria (Espagne)	3^m 00 1^m 00 7^m 00	23^m 11 8^m 09 9^m 85
Mende à La Bastide	2^m 00	18^m 30
Embrancht de Stravopol (Russie)	1^m C0 2^m 43	12^m 65 19^m 76
Pétrovsk à Bakou (Russie)	6^m 10 8^m 51	16^m 85 6^m 00
Tikhoreskaïa à Tzarytsine (Russie)	1^m 92 2^m 67 6^m 06	21^m 27 5^m 38 34^m 20
Langogne au Puy	2^m 00 1^m 00	5^m 50 10^m 00

Renvoi 15 (*suite*).

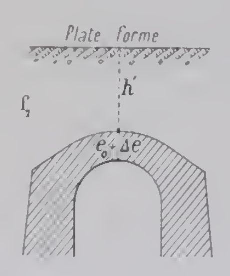
Lignes de :	Ouverture	Charge de remblai sur la voûte
Brioude à Saint-Flour	2^m 00 2^m 00 2^m 50 3^m 00 4^m 00 5^m 00 5^m 00	7^m 64 9^m 65 32^m 20 15^m 77 13^m 03 13^m 88 11^m 10

16

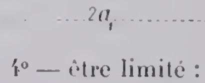
Lignes de :	Ouverture	Pente	Charge de remblai sur la voûte
Rodez à Millau	1^m 20	0.148	»
Mende à Sévérac	2^m 00 1^m 00 1^m 50	0.075 0.167 et 0.20 0.20	25^m 00 12^m 65 12^m 30
Marvejols à Neussargues	1^m 00 1^m 00 2^m 00	0.15 et 0.20 0.20 0.13	17^m 10 9^m 90 5^m 10

Art. 4. — Supplément d'épaisseur des ouvrages sous charge de plus de 3m de remblai.

A. — A la clef : Δe (f_7).



Les premiers mètres de surcharge pèsent de tout leur poids sur la voûte, mais le remblai des mètres suivants s'arc-boute au-dessus ; ne pèse sur la voûte que la terre comprise dans une sorte d'ogive ou d'ellipse surhaussée (f_8) dont la montée augmente avec l'ouverture de l'ouvrage.



Il doit y avoir, pour chaque ouverture, une hauteur limite de surcharge h'' à partir de laquelle un supplément de remblai ne donne plus de supplément de poussée [17].

C'est ainsi que des souterrains tiennent sous d'épaisses masses en mouvement.

J'admets que Δe doit :

1° — être nul pour des surcharges de 3m et au-dessous ;

2° — augmenter avec l'ouverture $2a$ et la surcharge h' ;

3° — cesser de croître à partir d'une certaine limite h'' de surcharge, laquelle augmente avec l'ouverture $2a$;

4° — être limité :

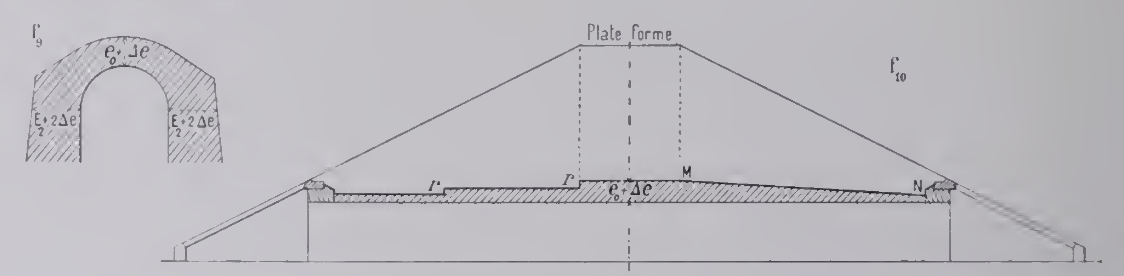
pour la portée de 5m (souterrain à une voie) : à 0m25 avec une hauteur limite $h'' = 16^m$.

pour la portée de 8m (souterrain à 2 voies) : à 0m36 avec une hauteur limite $h'' = 20^m$.

C'est d'après ces données qu'a été dressé au Titre II, chapitre I, § 1, art. 3, le tableau II des valeurs numériques de Δe.

B. — Aux naissances (f_9).

On a admis $2\,\Delta e$.



C. — Comment varie l'épaisseur de la voûte, d'une tête à l'autre (f_{10}).

L'épaisseur aux têtes et jusqu'à 3m de surcharge est e_0. Elle est $e_0 + \Delta e$ sur toute la largeur de la plate-forme.

De chaque tête au bord de la plate-forme, on gagnera le supplément Δe soit par une ligne continue d'extrados M N, soit par des ressauts r (f_{10}).

§ 7. — *OUVRAGES COURONNÉS AU NIVEAU DU RAIL OU AU NIVEAU DE LA PLATE-FORME ?*

Jusqu'à 3m de portée, l'ouvrage couronné au niveau de la plate-forme coûte moins cher ; de 3m à 6m, il coûte plus cher, mais la différence est négligeable. Il a l'avantage de conserver à la plate-forme sa largeur normale ; on le préférera donc jusqu'à 6m inclus.

17. On a impunément chargé des buses en ciment de hauts remblais, déposé à titre provisoire des remblais sur une file de tonneaux faisant aqueduc...

Pour 7m et 8m, bien que les différences soient peu importantes, on fera l'étude comparative.

Il peut y avoir quelquefois intérêt à couronner au niveau du rail les passages inférieurs à murs en retour, lorsque les chemins aux abords tournent très court ; on gagne ainsi 0m65 environ à chaque tête.

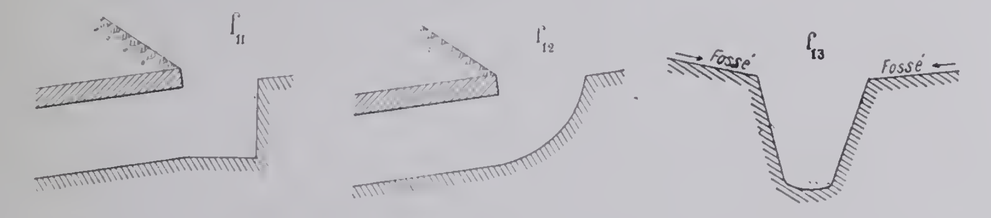
§ 8. — *PUISARDS*

Pour les ouvrages à flanc de coteau, il faut souvent placer un puisard à la tête amont.

L'inconvénient [18] des puisards est qu'ils s'obstruent par les matières entrainées, la neige... : il est particulièrement grave là où, comme dans les Cévennes, tombent de grosses pluies d'orage et où le terrain est très friable.

Pour réduire le danger d'obstruction, il faut :

1° — diminuer, autant que possible, le cube des matières entrainées, en maçonnant les fossés, les descentes d'eau et les parois des puisards, quand la roche n'est pas très solide ;



2° — pour que les matières ne séjournent pas dans le puisard, se bien garder, comme on l'a fait souvent fort à tort, d'araser horizontalement le plafond du puisard (f_{11}) : il faut, tout au contraire, lui donner beaucoup de pente, ou le dresser en courbe à très forte pente (f_{12}) ;

3° — pour éviter, en outre, les accumulations d'atterrissements le long des pieds-droits et faciliter le nettoyage du puisard, dresser en fruit ses muraillements (f_{13}) ;

4° — pour que les matières soient facilement entrainées par l'aqueduc, lui donner une très forte pente, 20 0/0 au moins si on le peut.

§ 9. — *OUVRAGES BIAIS*[19]

Art. 1 — Ouvrages couronnés au niveau du rail ou au niveau de la plateforme.

Il faut éviter les appareils biais.

Sur un cours d'eau tranquille, on peut presque toujours placer l'ouvrage normalement au chemin de fer ; les ouvrages droits sont plus courts, leurs têtes plus faciles à appareiller.

On pourra aussi courber en plan les longs ouvrages pour supprimer ou réduire le biais des têtes.

S'il faut accepter un ouvrage biais, on se conformera aux indications suivantes :

1° — Le biais (angle aigu du tracé et des pieds-droits) sera en nombre rond de degrés.

2° — Il n'y aura pas de changement de pente du tracé entre les projections sur lui des points extrêmes de l'ouvrage. Au besoin, on modifierait légèrement son profil en long.

3° — De 90° à 80°, les têtes seront appareillées comme droites.

4° — De 80° à 70°, la douelle sera celle d'une voûte droite. On retournera seulement les voussoirs de tête normalement aux têtes (V, p. 74).

5° — De 70° à 55°, on adoptera l'appareil hélicoïdal pour les arcs surbaissés, l'appareil

18. Il ne faut pas se l'exagérer. Entre Marvejols et Saint-Sauveur de Peyre, sur 34 aqueducs à puisard, au bout de 15 ans (de 1879 à 1894), tous ont été trouvés en bon état, fonctionnant bien, sauf un qui était engorgé, parce qu'il n'était pas revêtu et que la roche était délitée.

19. Voir Tome V, p. 72.

Léveillé [20] pour les pleins cintres et les ellipses ;

6° – Quand le biais sera de moins de 55° [21], on étudiera un tablier à poutrelles enrobées de béton, ou, à défaut, un tablier métallique.

Pour les ouvrages dont la longueur entre têtes sera supérieure à quatre fois l'ouverture biaise, on n'appareillera en biais, à partir de chaque tête, qu'une longueur égale à cette ouverture.

Art. 2. — Ouvrages sous charge.

Pour tous les ouvrages sous charge, les têtes resteront droites, c'est-à-dire perpendiculaires à l'axe de l'ouvrage, sous plinthes rampantes, à condition que le remblai soit assez haut pour que la plinthe ne sorte pas de la plate-forme. (Voir plus loin Titre II, chapitre V).

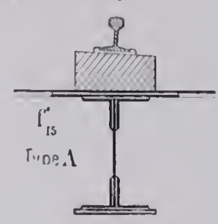
§ 10. — *TABLIERS MÉTALLIQUES, POUTRELLES ENROBÉES.*

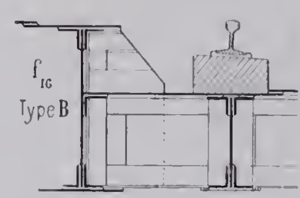
Art. 1. — Tabliers métalliques.

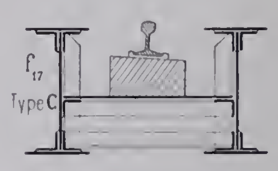
La longrine sous le rail repose : soit directement sur la poutre principale (Type A, f_{15}) ; soit sur un longeron (Type B, f_{16}) ; soit dans une poutre à caisson (Type C, f_{17}).

On choisira suivant l'épaisseur dont on dispose, (l'épaisseur est la distance verticale entre le dessus du rail bas et le point le plus bas du dessous des poutres principales).

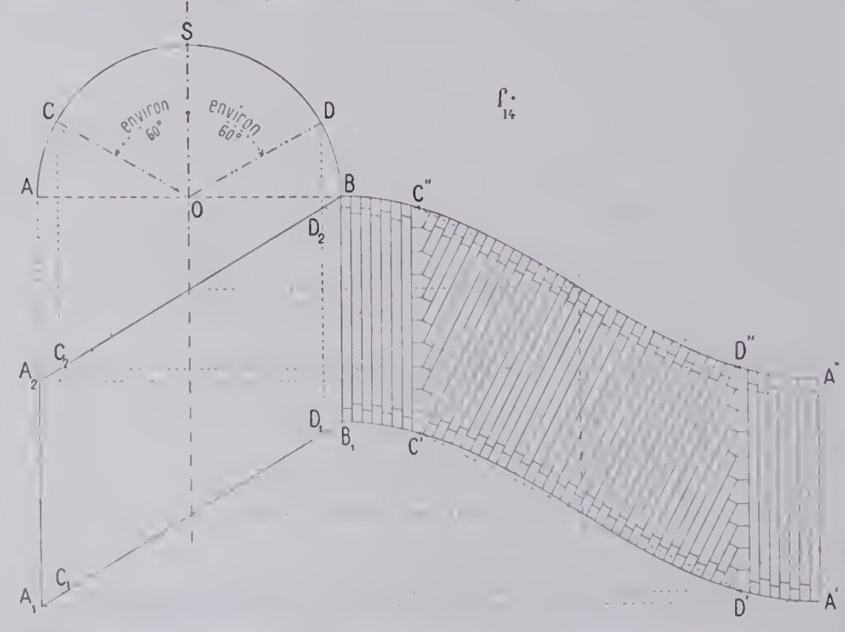
Si la hauteur est suffisante, on adoptera le type A plus économique ; si non, — soit le type B, dont les longerons s'inscrivent facilement dans les courbes à petit rayon, — soit le type C, si la hauteur manque.







Pour un pont biais, la portée des poutres sera comptée suivant le biais ; à l'ouverture biaise, on ajoutera la distance à réserver entre les bords des sabots et les parements des culées, laquelle est au moins 0m10 comptée normalement au parement de la culée.



20. Dans l'appareil Léveillé (f_{14}), les segments de voûte AC et BD, au-dessous du milieu de la montée, sont traités comme un berceau droit (assises parallèles à la ligne des naissances) ; le cerveau CSD, au-dessus du milieu de la montée, est en appareil hélicoïdal. Pour CSD, sur la douelle développée, les lignes d'assises sont des droites perpendiculaires aux cordes C'D', C"D" des courbes de tête développées. Pratiquement, l'angle COS = SOD sera pris (près de et un peu au-dessus de 60°), de façon que tous les voussoirs des têtes aient même largeur en douelle et que le point S tombe au milieu d'un voussoir.

21. A la page 75 du Tome V, on a indiqué 50° comme limite du biais : on l'a élevée ici à 55° pour les ouvrages courants.

Voici les épaisseurs des trois types :

Ouverture droite	Type A		Type B		Type C	
	N° des types	Epaisseur de tablier	N° des types	Epaisseur de tablier	N° des types	Epaisseur de tablier
0m 60	»	»	Au-dessous de 0m70 d'épaisseur, on n'a plus assez de hauteur pour bien fixer les longerons aux entretoises.		»	0m 502
0 70	»	»			»	(si la haut. manque, 0 401)
1 00	»	»			»	
1 50	N° 1	0m 600			N° 21	0 502
2 00	2	0 640			22	0 502
3 00	3	0 652			23	0 502
4 00	4	0 740			24	0 504
5 00	5	0 812	N° 13	0m 730	25	0 511
6 00	6	0 900	14	0 735	26	0 526
7 00	7	0 980	15	0 735	27	0 558
8 00	8	1 080	16	0 793	28	0 624

Ces épaisseurs de tablier sont pour le rail de 130mm de hauteur (Vignole de 39k). Elles devront être augmentées de 0m012, pour celui de 142mm de hauteur (Vignole de 48k).

Art. 2. — Tabliers à poutrelles enrobées de béton [22].

Depuis quelques années, on fait couramment des tabliers sous rails avec des poutrelles d'acier en I enrobées de béton de ciment : ciment 300k, sable 400l, gravier ou pierre cassée 800l.

Jusqu'à la portée de 10m, les poutrelles ont les hauteurs que fournissent couramment les forges.

Dans les calculs de résistance, on ne tient compte que des poutrelles.

Les tabliers à poutrelles enrobées ont, sur les métalliques, les avantages suivants :

1° — ils sont très faciles à exécuter ;

2° — on y pose la voie sur ballast et sur traverses, comme en voie courante ;

3° — ils ne demandent pas plus d'entretien que les ouvrages voûtés : l'acier enrobé de béton ne craint plus la rouille.

Si l'épaisseur de l'ouvrage n'est pas strictement limitée, on protégera le dessous des poutrelles, spécialement au-dessus des cours d'eau et des voies de chemins de fer, par un enduit en mortier de ciment : l'épaisseur du tablier est alors augmentée de 0m030.

Voici, pour des ouvertures de 0m60 à 8m en palier, l'épaisseur des divers types d'ouvrages, comptée à partir du dessus du rail bas (0m50 au-dessus de la plate-forme).

Ouverture	Epaisseur entre le dessus du rail bas (0m50 au-dessus de la plate-forme) et le dessous des :			Economie d'épaisseur des tabliers métalliques du type C par rapport :	
	tabliers métalliques (type C)	poutrelles enrobées (non compris la chape inférieure)	clefs des ouvrages voûtés (sans le matelas *m* sur la chape f_{11} - p. 21)	aux ouvrages avec poutrelles enrobées	aux ouvrages voûtés (sans le matelas *m* sur la chape f_{11} - p. 21)
0m 60	0m 401 ou 0m 502	0m 760	0m 90	0m 359 ou 0m 258	0m 499 ou 0m 398
0 70	0 401 ou 0 502	0 760	0 91	0 359 ou 0 258	0m 509 ou 0m 408
1 00	0 401 ou 0 502	0 760	0 94	0 359 ou 0 258	0m 539 ou 0m 438
1 50	0 502	0 780	0 98	0 278	0 478
2 00	0 502	0 800	1 02	0 298	0 518
2 50	0 502	0 820	1 05	0 318	0 548
3 00	0 502	0 850	1 08	0 348	0 578
3 50	0 502	0 880	1 11	0 378	0 608
4 00	0 504	0 910	1 16	0 406	0 656
5 00	0 511	0 970	1 20	0 459	0 689
6 00	0 526	1 030	1 25	0 504	0 724
7 00	0 558	1 090	1 28	0 532	0 722
8 00	0 624	1 150	1 32	0 526	0 696

22. Adoptés dès 1901 par la Cie de l'Est ; aujourd'hui, par l'Etat, l'Orléans, le PLM.

Les épaisseurs des ponts à poutrelles enrobées peuvent légèrement varier s'ils sont en rampe. En palier, ou en rampe de moins de 0,015, on dresse la chape en dos d'âne, à pentes de 0,015, de manière à renvoyer les eaux vers les culées ; en rampe de 0,015 ou plus, la chape a celle de la voie : les eaux vont à la culée basse.

Art. 3. — Choix à faire entre les voûtes, les tabliers à poutrelles enrobées et les tabliers métalliques [23].

Adopter toujours l'ouvrage voûté, lorsqu'il est possible.

Lorsqu'il ne l'est pas (manque de hauteur, biais trop aigu), préférer le tablier à poutrelles enrobées au tablier métallique.

N'accepter le tablier métallique que si on n'a pas la hauteur pour le tablier à poutrelles enrobées.

Sous les tabliers sur cours d'eau, à poutrelles enrobées ou métalliques, les revanches minima sont celles données pour les ouvrages voûtés en plein cintre (p. 9).

§ 11. — *QUELQUES DISPOSITIONS EXCEPTIONNELLES.*

Les ouvrages devront toujours être exactement adaptés, ajustés au terrain.

Ce ne seront pas des ouvrages « de confection » : ils seront faits sur mesure, je veux dire qu'ils doivent être faits pour le terrain et le cours d'eau, et non le terrain ou le cours d'eau pour eux.

Il faudra, dans certains cas, accepter des ouvrages courbes en plan et même courbes en profil.

Dans les ravins à grande pente, il y aura quelquefois avantage à faire déboucher les ouvrages de flanc, en dehors et au-dessus du thalweg. Dans ce cas, si la tête amont est aussi en dehors du thalweg, il faut remblayer à l'amont pour combler l'ancien lit, conduire les eaux au nouveau, les écarter du pied du remblai. Dans l'ancien thalweg, sous le remblai, on disposera un drain à pierres sèches ou un simple filtre pour écouler les eaux d'infiltration.

Les ouvrages ainsi établis en dehors du thalweg doivent être tout entiers en déblai, je veux dire que le lit d'amont, l'ouvrage et le lit d'aval doivent être en déblai.

CHAPITRE VII

CHAPES

Art. 1. — Leur constitution suivant l'ouverture.

Pour les voûtes de moins de 4^m, l'extrados sera revêtu d'une chape en mortier de chaux hydraulique, en 2 couches de 0^m03 massivées à la savate.

Pour celles de 4^m et au-dessus, sur la première chape en chaux de 0^m03, on étalera une chape en asphalte de 0^m015 (2 couches de 0^m0075 — la première en mastic pur additionné de 7 0/0 de son poids de bitume, la seconde avec une 1/2 partie de sable, 1 de mastic pur additionné de 7 0/0 de son poids de bitume), puis on défendra cette chape par une contre-chape en béton maigre de ciment de 0^m04.

On barbouillera de 3 couches de coaltar (goudron minéral bouillant et flambé) :

1° — les chapes non asphaltées (ouvrages de moins de 4^m) ;

2° — tous les parements cachés des maçonneries.

23. On avait jusqu'à ces derniers temps accepté, pour des ouvertures de 0^m70, des aqueducs dits à plancher : rails sur longrines en bois. Sous les charges et les vitesses croissantes, les longrines ne sont plus assez sûres.

Au-dessus de la chape, on ménagera, autant que possible, sous le ballast, une épaisseur de remblai de 0m40, ce qui porte la hauteur totale entre le dessus du rail et l'extrados de la clef à :

Art. 2. — Matelas entre le dessus de la chape et la plate-forme, pour les ouvrages non surchargés.

Ouvrages de moins de 4m d'ouverture :

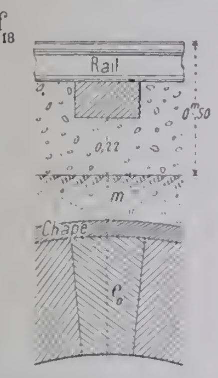
0m06 (chape) + 0m40 (matelas) + 0m50 (ballast = 0m96.

Ouvrages de 4m d'ouverture et au-dessus :

0m085 (chapes et contre-chape) + 0m40 (matelas) + 0m50 (ballast) = 0m985.

Mais en appliquant rigoureusement cette prescription, on réduirait beaucoup le nombre des ouvrages voûtés, ce qui serait fort regrettable.

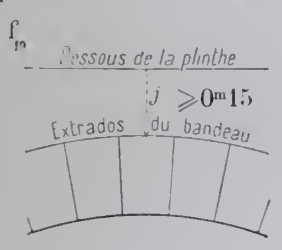
Pour la plupart des ouvrages courants de la ligne de Montauban à Castres, situés dans la plaine du Tarn et de l'Agoût, souvent sur d'autres lignes, on n'a pu adopter la maçonnerie qu'en réduisant sensiblement, voire même en supprimant, le matelas de remblai sous le ballast.



Au-dessous de la traverse portant le rail de 48 kilos, il reste une épaisseur de ballast de 0m22 (f_{18}) ; avec un matelas *m* réduit à 0m18, on disposera donc encore d'une épaisseur de 0m40, bien suffisante pour protéger contre les pinces des poseurs les chapes des ouvrages qui, du reste, ne sont exposées qu'au sommet de la voûte.

A nombre d'ouvrages, il n'y a que 0m65 entre le dessus du rail et la chape, soit un matelas de 0m15 sous le ballast.

Il doit donc être entendu que l'épaisseur de 0m40 pour le matelas est désirable ; qu'un matelas de 0m30 est encore fort convenable ; qu'on pourra sans très grave inconvénient le réduire à 0m20, à 0m15, qu'il pourra encore être réduit, et même à la rigueur supprimé.



Entre le dessous de la plinthe et l'extrados du bandeau [24], il faut (f_{19}) $j \geqslant 0.15$, épaisseur d'un moellon.

Si le matelas *m* (f_{18}) était trop réduit, on n'aurait pas 0m15 : alors on prolongerait la clef et, au besoin, les deux contre-clefs jusque sous la plinthe, soit en continuant les lits du bandeau, soit en les retournant verticalement.

CHAPITRE VIII

COURONNEMENT

§ 1. — *PLINTHES*

Art. 1. — Niveau du dessus.

Pour les ouvrages couronnés au niveau de la plate-forme, la plinthe sera en saillie de 0m05 sur la plate-forme.

Pour ceux couronnés au niveau du rail, le dessus de chaque plinthe sera toujours de 0m10 en contre-bas du rail voisin.

Donc, dans les courbes, la plinthe du côté du grand rayon sera surhaussée du dévers par rapport à l'autre.

Dans les pentes, chaque plinthe aura la pente du rail voisin.

Pour les ouvrages sous charge, la plinthe sera en crossette, sans saillie sur le plan du talus.

24. Les dimensions de la plinthe et du bandeau sont données Titre II, Chapitre I.

Art. 2. — Tracé dans les courbes.

En courbe et en raccordement parabolique :

1° — Pour les ouvrages à murs en aile, les plinthes et les têtes seront droites et parallèles à la corde du tracé sur la longueur des plinthes.

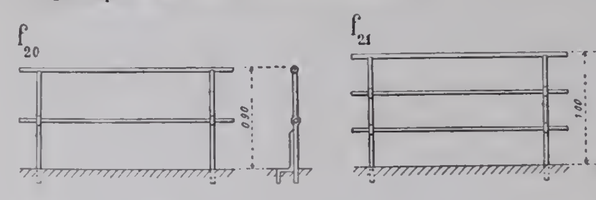
2° — Pour les ouvrages à murs en retour, les plinthes, têtes et murs en retour seront courbes et parallèles à la courbe du tracé.

§ 2. — *GARDE-CORPS*

Art. 1. — Ouvrages sous rails.

A. — Types.

Pour tous les ouvrages sous rails, on n'emploiera que des gardes-corps métalliques et non des parapets en maçonnerie, savoir :

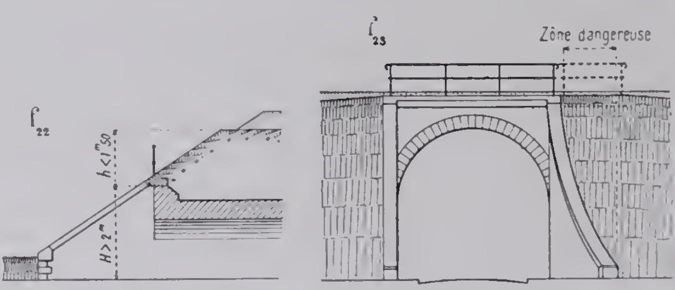


dans tous les ouvrages hors des gares, le type à 2 lisses horizontales (f_{20}), de 0^m90 de hauteur pesant 13^k le mètre courant ;

dans les gares et aux abords (à moins de 200^m en avant et moins de 150^m en arrière du milieu des trottoirs), le garde-corps à trois lisses (f_{21}) de 1^m00 de hauteur pesant 21^k le mètre courant.

B. — Sur quels ouvrages ?

On ne mettra de garde-corps que :



1° — sur tous les ouvrages couronnés au niveau du rail ;

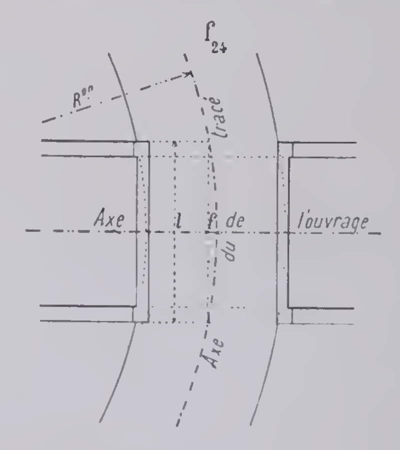
2° — sur ceux de 1^m00 d'ouverture et au-dessus, si le dessous de la plinthe remplit les deux conditions suivantes : (f_{22})

α — être à plus 2^m00 au-dessus du radier ;

β — être au niveau de la plateforme ou à moins de 1^m50 au-dessous.

On prolongera les garde-corps si les abords des ouvrages sont dangereux,[25] ouvrages à murs en aile biais ou courbes (f_{23}).

C. — Distance à l'axe de la voie voisine.



En alignement, la distance de la face intérieure du garde-corps à l'axe de la voie voisine sera de :

2^m90 pour les ouvrages couronnés au niveau de la plateforme ;

2^m255 [26] pour les ouvrages couronnés au niveau du rail.

En courbe (f_{24}), pour les ouvrages avec murs en aile, la distance de la face intérieure du garde-corps à l'axe de la voie voisine, mesurée suivant l'axe de l'ouvrage, sera :

25. Une dépêche ministérielle du 15 février 1898 invite la Compagnie P.L.M. à prolonger les garde-corps des ouvrages dangereux.

26. 1^m50 (distance libre à l'axe du rail voisin. — Règlements ministériels sur les ponts métalliques des 29 août 1891, art. 11, et 8 Janvier 1915, art. 27) + $\frac{1^m51}{2}$ (demi-voie) = 2^m255.

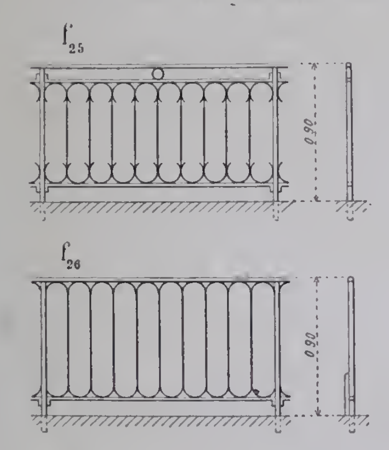
	Du côté du grand rayon	Du côté du petit rayon
Ouvrages couronnés au niveau de la plate-forme...	$2^m90 + \frac{7}{5} D$[27]	$2^m90 + f$
Ouvrages couronnés au niveau du rail	2^m255	$2^m255 + \frac{3}{5} D$[28] $+ f$

D est le dévers maximum de la voie ;

$f = \frac{l^2}{8R}$ est la flèche du tracé en courbe de rayon R, sur la longueur l des plinthes, y compris la largeur des rampants.

Pour les ouvrages avec murs en retour, on ne tiendra pas compte de la flèche f.

Art. 2. — Ouvrages hors la voie.



On adoptera :

pour les ouvrages hors des villes, le garde-corps à maillons [29] de 0^m90 de hauteur (f_{25}) pesant 33^k le mètre courant ;

aux abords des villes ou sur les routes très fréquentées, un type (f_{26}) un peu plus robuste pesant 35^k le mètre courant.

Dans certains cas, bien qu'il augmente la largeur entre têtes, on adoptera un parapet en maçonnerie ; il est un peu plus sûr, et ne demande pas d'entretien. On supprimera alors la plinthe : elle n'est pas motivée entre un tympan et un parapet pleins de même aspect.

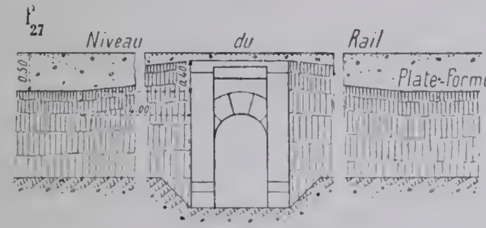
En dressant les projets des ouvrages, on distribuera les panneaux du garde-corps et on appareillera les pierres de taille du couronnement, de manière à ne pas avoir de montants à sceller à moins de 0^m15 des joints.

Les garde-corps métalliques doivent être peints en gris très clair et non en nuance foncée, pour réduire la dilatation, pour mieux voir si le garde-corps commense à s'oxyder.

CHAPITRE IX

ABORDS

Art. 1. — Comment on relève la banquette aux abords des ouvrages couronnés au niveau du rail.



De part et d'autre des abouts des plinthes (f_{27}), la banquette sera relevée de 0^m40 et se raccordera à la plate-forme sur une longueur de 4^m.

Art. 2. — Quarts de cône.

Si l'ouvrage est avec murs en retour, on établira le remblai de façon que les sommets des quarts de cône soient au niveau du dessus de la plinthe et dans le plan du parement du mur. Sans cette précaution souvent négligée, ces ouvrages semblent déchaussés ou mal tracés.

Les quarts de cône non revêtus seront toujours au talus de 3/2.

27. $\frac{7}{5}$ D, pour ne pas rétrécir la largeur de la banquette sur les ouvrages arasés au niveau de la plate-forme du côté extérieur des courbes.

28. $\frac{3}{5}$ D, pour conserver la même distance entre le sommet du garde-corps supposé de 0^m90 de hauteur et les wagons inclinés par le dévers :

$$D \times \frac{0^m90 \text{ (garde-corps)}}{1^m50 \text{ (largeur de la voie)}} = \frac{3}{5} D$$

29. Avec vides d'au plus 14 cm, un enfant qui commence à marcher ne peut pas passer à travers.

On aura soin de les bien défendre : s'ils s'éboulaient, ils pourraient entrainer assez de remblai pour interrompre la circulation.

Art. 3. — Ouvrages hors la voie.

Sauf le cas où leurs terrassements feraient corps avec ceux de la ligne, les ouvrages sous un chemin latéral doivent être bien séparés des ouvrages sous la voie, ceci en vue de la remise aux intéressés.

On réduira autant que possible le nombre des ouvrages à remettre plus tard à des particuliers : passages privés, aqueducs, bâches, siphons pour canaux d'irrigation, etc. La remise et l'entretien ultérieurs donnent fréquemment lieu à des difficultés avec les intéressés : il peut être moins coûteux de les indemniser que de faire l'ouvrage.

Art. 4. — Remblais contre les ouvrages.

A. — Nature des remblais.

On choisira des déblais perméables et qui n'attaquent pas le mortier : des déblais rocheux, du gravier, des pierres cassées ; on exclura l'argile, le gypse...

Quand ce sera trop cher, on entourera l'ouvrage (pieds-droits et voûte) d'une chemise à pierres sèches rangées à la main, de 0^m30 d'épaisseur pour les ouvrages de 2^m et au-dessous, de 0^m40 pour ceux de plus de 2^m.

L'eau filtrant à travers cette chemise est écoulée par une file de barbacanes au bas des pieds-droits ; dans les ouvrages sur cours d'eau, on n'en ménagera pas ; on assurera l'écoulement de l'eau vers les têtes.

B. — Précautions à prendre pour que l'ouvrage ne se déverse pas pendant l'exécution du remblai.

Il faut bien éviter de charger de flanc, d'un seul côté, les ouvrages sous charge, surtout ceux en ellipse surhaussée, surtout ceux avec $b=2a$. (p. 15).

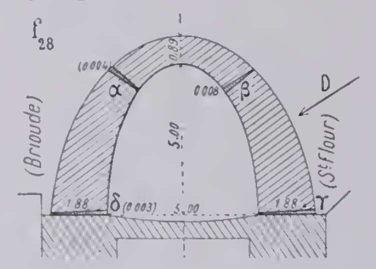
Des ouvrages en plein cintre [30], en ellipse surhaussée [31], ont subi des déversements ou tout au moins des fissures, qu'on aurait dû éviter.

Je rappelle les précautions à prendre pour l'exécution des ouvrages sous charge et des remblais autour d'eux.

1° — Bien encastrer les fondations dans le terrain solide, maçonner à pleine fouille dans le roc.

30. Sur les lignes de Brioude à Alais, La Clayette à Lamure, Paray à La Clayette.

31. Ligne de Brioude à Saint-Flour :



1° — Pont de 5^m (f_{28}) d'ouverture sur le ruisseau de Vendage, sous 20^m de remblai — fondé sur rocher — enveloppé d'une chemise en pierres sèches de 0^m40 d'épaisseur.

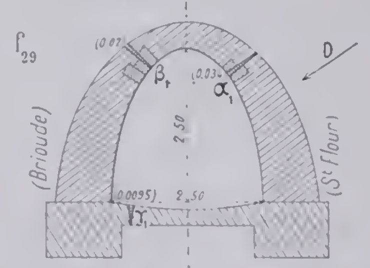
La décharge de côté D y produisit 4 fissures : β (8^{mm}) et δ (3^{mm}) apparentes, α γ seulement décelées par quelques plaquettes de mortier détachées dans les joints.

Fissure δ. — On la refouilla sur 0^m30, et on y bourra, à refus, du mortier pulvérulent de ciment.

Partie de la fissure β. — On enleva la file de moellons au-dessus de β, par longueurs de 1^m50 ; derrière, on ouvrit et on creusa la fissure sur 0^m25 à 0^m30 ; puis on y mata à refus du mortier pulvérulent, on replaça les moellons, on mata les lits.

Reste de la fissure β et fissures α et γ. On dégrada les joints sur 0^m20, on perça sur la fissure des trous de $3^{cm}5$ de 2^m en 2^m, de préférence sur un joint, on y engagea de 0^m10 des tuyaux de plomb de 0^m20 par lesquels on injecta, sous pression d'air, un coulis de ciment (50 k. de ciment pour 35 litres d'eau).

On a dépensé 2.017 fr, soit par mètre courant de fissure, 57 fr. 95 pour le matage, 15 fr. 92 pour l'injection : c'est 2,7 % du coût de l'ouvrage (74.135 fr.).



2° Ponceau de 2^m50 (f_{29}) sur l'Alagnonette, sous 34^m de remblai, enveloppé d'une chemise en pierres sèches de 1^m recouverte d'un matelas de 4^m.

La décharge D y produisit 3 fissures :

$α_1$ — qui avait 34^{mm} sur 76^m de long ;

$γ_1$ — fente dans le radier : $9^{mm}5$ sur 66^m.

$β_1$.

On soutint la voûte par des contre-fiches. Le mouvement s'arrêta quand le remblai atteignit 20^m de haut.

On ficha $γ_1$ au ciment.

Pour réparer $α_1$ on enlevait deux files de moellons par longueur de 2^m environ ; derrière, on ouvrait et on creusait la fente, on y matait du mortier pulvérulent, puis on replaçait les moellons et on matait les lits.

Pour réparer $β_1$ on dut démolir 3 assises ; on remplit ensuite $β_1$ comme $α_1$.

On a dépensé 5.583 fr, soit 36 fr. 20 par mètre courant des fissures $α_1$ et $β_1$, 12 fr. 20 par mètre courant de la fissure $γ_1$: c'est 9,4 % du coût de l'ouvrage (59.169 fr).

2° — Pour que l'ouvrage ne soit pas cisaillé, bien éviter toute surface horizontale ; la maçonnerie des pieds-droits y sera très enchevêtrée, très hérissée, faisant bien corps avec le massif de fondation.

3° — L'envelopper de chemises superposées de pierres sèches appareillées grossièrement en voûte, sur une épaisseur augmentant avec l'ouverture de la voûte et la hauteur du remblai, — réduite vers les têtes.

4° — Entourer le tout d'un épais matelas de terre bien pilonnée, pour résister au déversement de l'ouvrage, pour amortir les chocs des pierres tombant de haut : au moins 2ᵐ sur l'axe de l'ouvrage pour une ouverture de 3ᵐ ; 2ᵐ50 à 3ᵐ sur les flancs ; moins aux têtes.

Il faut un fort matelas : consolider ou réparer un ouvrage fendu ou déversé coûterait beaucoup plus que lui.

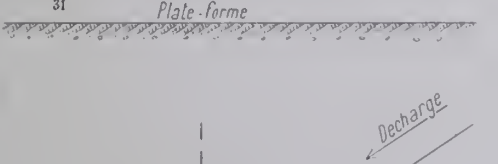
5° — On ne commencera à décharger des remblais poussant contre l'ouvrage qu'après l'achèvement du matelas.

6° — Si on le peut, lorsque la décharge arrivera (f_{30}) en A par exemple, on l'arrêtera.



On traversera l'ouvrage sur une charpente provisoire, et l'on déchargera les terres de l'autre côté jusqu'à atteindre le talus BB', puis on remblaiera l'intervalle AB, A'B' de terres légères, perméables, de gravier... jusqu'à une hauteur au-dessus de l'ouvrage, à spécifier dans chaque cas.

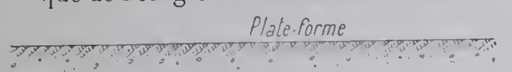
7° — Si on est forcé de décharger les terres d'un seul côté, on devra d'abord étayer par du remblai pilonné le côté opposé à la décharge.



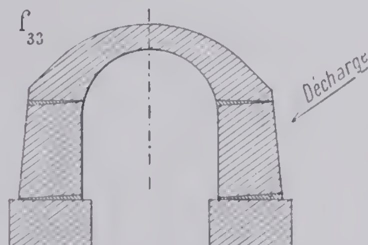
8° — Il ne faut jamais laisser faire la décharge directement contre le talus.

Par exemple, une fois que le talus est arrivé suivant AB (f_{31}), il faut remplir, par du remblai remanié, le trapèze ABCD, puis quand le talus est en GE on remplit de remblai remanié le trapèze GEDF, de façon qu'il y ait toujours du remblai horizontal entre le talus du matelas pilonné et le talus de la décharge.

9° — Lorsqu'un ouvrage est au pied d'un talus naturel assez incliné (f_{32}), il est fort important que de bon gradins retiennent le remblai.



10° — Sous une charge de flanc, les ouvrages se déversent toujours comme l'indique le croquis ci-contre (f_{33}).



Il faut constamment avoir l'œil sur les parties les plus exposées à se fendre.

Le chef de section doit mettre partout des témoins en plâtre ou en ciment, et les suivre tous les jours.

11° — Si, malgré les précautions prises, on aperçoit une fente en un point, il faut immédiatement remettre la voûte sur cintre, et la soutenir par des étais contre la poussée.

Dès qu'on a quelque crainte, ne pas attendre qu'il y ait des fissures : étayer par avance.

MATÉRIAUX

DÉSIGNATION. — ABRÉVIATIONS. — DISTRIBUTION

Désignation des Matériaux	Abréviations à inscrire sur les dessins	Parties des ouvrages où on les emploiera
Maçonnerie de : pierre de taille[1].	**P T**	*Plinthes, tablettes rampantes, crossettes et dés aux abouts des rampants, couronnement des murettes de retour.*
Maçonnerie de : libages.	**L**	*Garde-radiers. — Dés où sont scellés les garde-corps sur les murs en retour d'ouvrages en rase campagne.*
Maçonnerie de : moellons d'appareil.	**M A**	*Encadrement des puisards. — Chaînes d'angle.*
Maçonnerie de : moellons d'appareil employés dans les voûtes (taillés en forme de voussoirs).	**M A V**	*Bandeaux des têtes.*
Maçonnerie de : moellons équarris employés dans les voûtes (taillés en voussoirs).	**M E V**	*Douelle des voûtes sur 0m30 d'épaisseur moyenne jusqu'aux naissances dans les pleins cintres, jusqu'au milieu de la montée dans les ellipses surhaussées ; cerveau des voûtes de moins de 3m d'ouverture sur toute l'épaisseur.*
Maçonnerie de : moellons ordinaires en parements vus : par assises horizontales. à joints incertains.	 **M O H** **M O I**	*Parements vus des pieds-droits, murs en aile, murs en retour, murettes de retour, tympans, puisards, etc..., sur une épaisseur moyenne de 0m25.* *Parements vus des radiers sur une épaisseur de 0m20.*
Maçonnerie de : moellons ordinaires méplats, bien lités, employés dans les voûtes.	**M O V**	*Queutage des voûtes :* *en plein cintre, au-dessus du milieu de la montée ;* *en ellipse surhaussée, au-dessus des 3/4 de la montée.*
Maçonnerie de : moellons ordinaires à mortier.	**M O**	*Toutes les maçonneries de moellons à mortier non désignées ci-dessus.*
Béton de chaux.	**B O**	*En fondation, si le béton est plus économique que la maçonnerie (M O).*
Béton de ciment.	**B C**	*Au lieu du béton de chaux, quand ce sera nécessaire.* *(Fondations dans l'eau, en terrains gypseux, etc...)*
Matériaux rangés à la main derrière les maçonneries.	**P S**	*Chemise derrière les pieds-droits, murs en aile, murs en retour, murettes de retour, etc...*
Dalles.	**D**	*Couverture des dalots.*
Chape : de 0m03 d'épaisseur en mortier de chaux hydraulique.	»	*Sur les voûtes de 4m et au-dessus et sur les glacis des murs de tympans, murs en aile, murs en retour, murettes de retour.*
Chape : de 0m06 d'épaisseur en mortier de chaux hydraulique.	»	*Sur les voûtes de moins de 4m d'ouverture.*
Chape : de 0m015 d'épaisseur en asphalte (2 couches de 0m0075).	»	*Sur les chapes en mortier de chaux de 0m03 des voûtes de 4m00 et au-dessus.*
Contre-chape de 0m04 d'épaisseur en béton maigre de ciment (100 k de ciment pour 1 m. c. de gravillon sans sable).	»	*Sur les chapes en asphalte.*
Goudronnage à 3 couches de coaltar.	»	*Tous les parements cachés des maçonneries et les chapes en mortier de chaux non recouvertes d'asphalte.*

1. Pour les petits ouvrages, il est en général inutile de boucharder la pierre de taille.

CHAPITRE XI

SONDAGES

1. — Les sondages doivent être faits à côté des fondations, et non à leur emplacement même; car, comme ils sont d'ordinaire plus profonds qu'elles, il faut alors les remplir de maçonnerie, ce qui est une dépense inutile, et ce qui peut, en outre, dans les terrains qui ne sont pas rigoureusement incompressibles, former sous les maçonneries un point dur, et les faire casser.

2. — J'appelle toute l'attention sur les sondages à l'emplacement des ouvrages. Il en faut assez pour bien définir la nature du terrain sur toute la longueur de l'ouvrage, pour représenter sur la coupe en long, sans grande erreur, par des lignes continues, les séparations des différentes couches; un sondage unique peut suffire pour un ouvrage court dans un terrain connu; mais pour des ouvrages longs et en terrain variable, il en faut au moins 3 : 1 au milieu et 1 à chaque tête.

3. — Dans certains cas, on fera une saignée longitudinale suivant l'axe de l'ouvrage.

4. — Quand on trouve du rocher, il faut non seulement s'assurer qu'il règne sous tout l'ouvrage, mais encore vérifier son épaisseur en le perçant à la barre à mine. On peut avoir, en effet, rencontré une dalle peu épaisse ou un bloc isolé.

Il faut toujours savoir ce qu'il y a au-dessous du sol de fondation sur lequel on s'arrête.

CHAPITRE XII

FONDATIONS

Je ne puis évidemment donner ici que des indications très générales.

1° — Il ne faut pas être aussi exigeant pour les fondations d'un ouvrage courant que pour celles d'un grand : il est absurde, comme je l'ai vu faire, de fonder à 14^m de profondeur un ouvrage de 2^m.

2° — Quand le rocher est trop loin, on peut : soit fonder sur radier, soit descendre sur le rocher des piliers que l'on relie par des voûtes sur lesquelles on établit les pieds-droits, soit encore soutenir le radier par de petits pilotis dont les pointes touchent le terrain ferme. (Exemples, p. 28, 29.)

3° — Pour les petits ouvrages, il n'est pas nécessaire d'avoir un terrain de fondation incompressible : il suffit qu'il soit peu, mais uniformément compressible.

Quelquefois le terrain est moins solide en dessous qu'en dessus; dans ce cas, se garder de descendre trop bas.

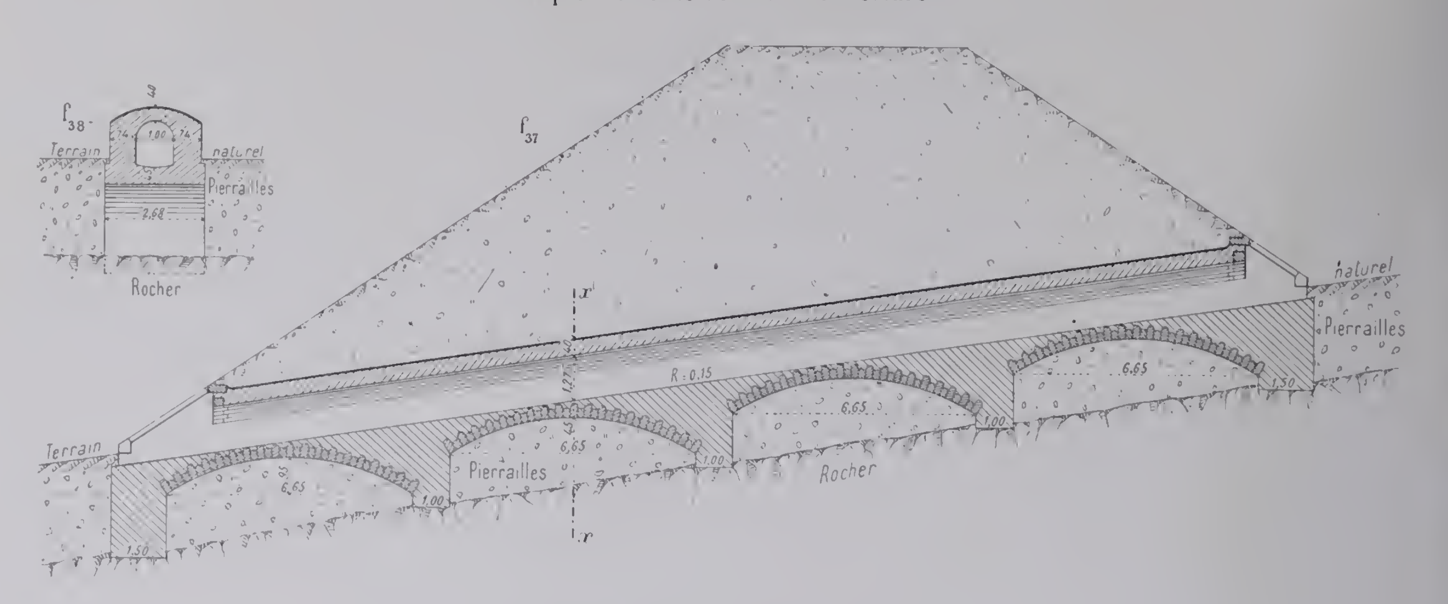
4° — Quelquefois, une partie de l'ouvrage se trouve sur le rocher incompressible, l'autre sur des apports, sur des terrains vaseux, etc...; dans ce cas, il se cassera au point de passage — c'est sans grand inconvénient. On peut d'ailleurs, par un coup de sabre vertical, ménager d'avance une séparation régulière.

5° — Quand il n'y a aucun danger d'affouillement, on peut, à l'extrême rigueur, fonder les aqueducs hors la voie de 0^m60 à 1^m sur une couche uniforme de pierres cassées, de gravier ou de sable, arrosée d'un lait de chaux.

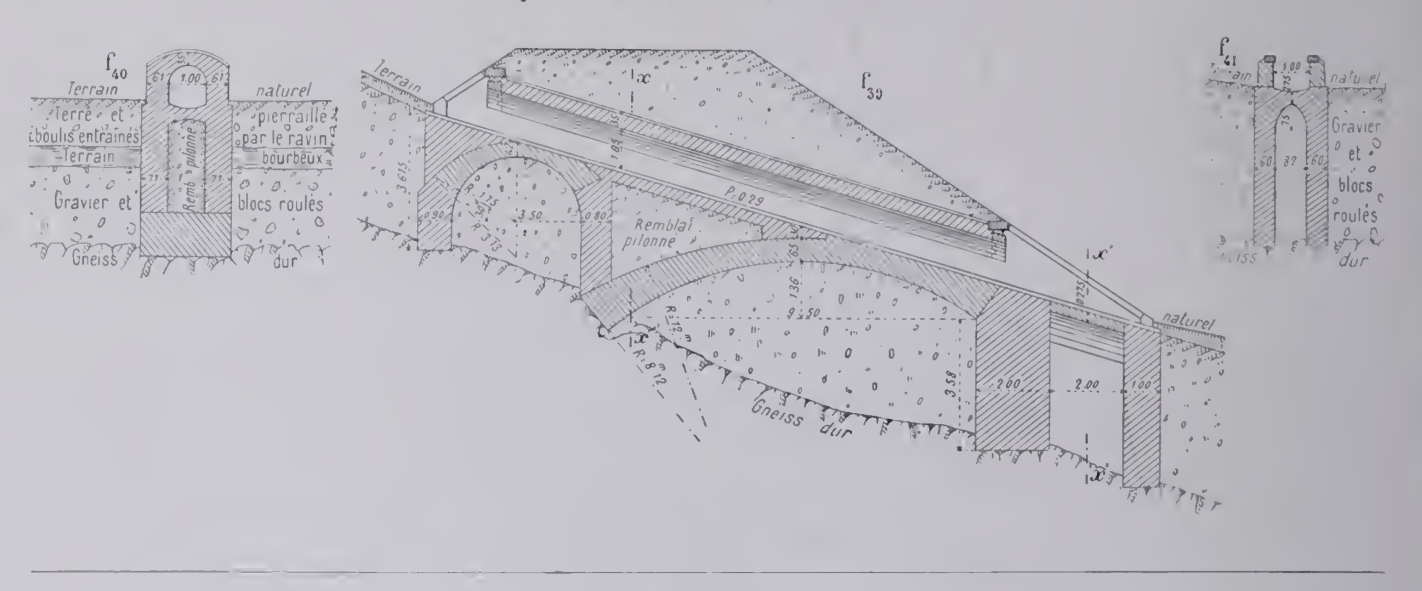
Coupes en long sur l'axe et coupes

LIGNE DE MENDE A LA BASTIDE

Aqueduc voûté de 1m00 d'ouverture

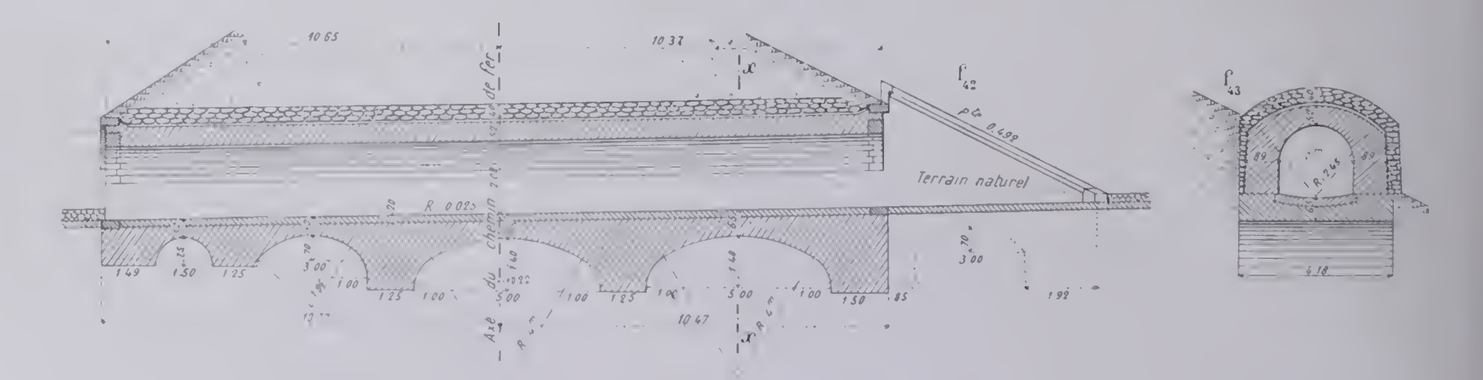


Aqueduc voûté de 1m00 d'ouverture



LIGNE DE BRIOUDE A SAINT-FLOUR

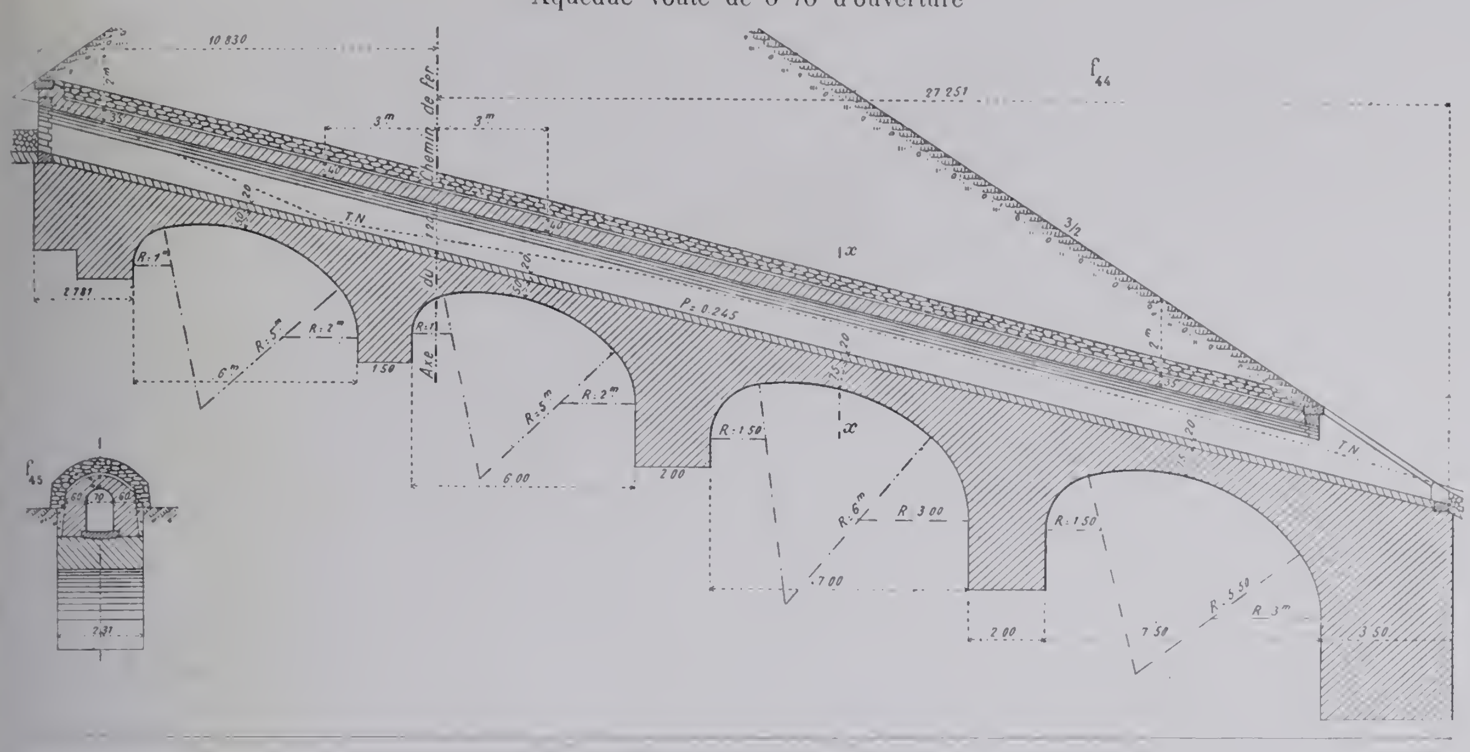
Ponceau voûté de 2m00 d'ouverture, biais à 50°



en travers sur xx des coupes en long — 5mm

LIGNE DE BRIOUDE A SAINT-FLOUR

Aqueduc voûté de 0m70 d'ouverture

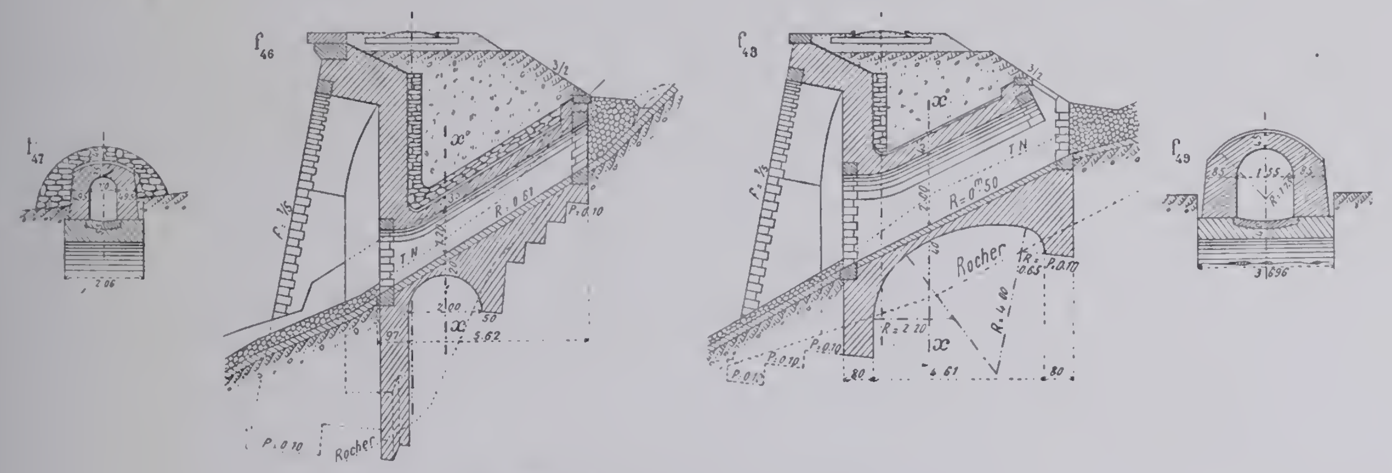




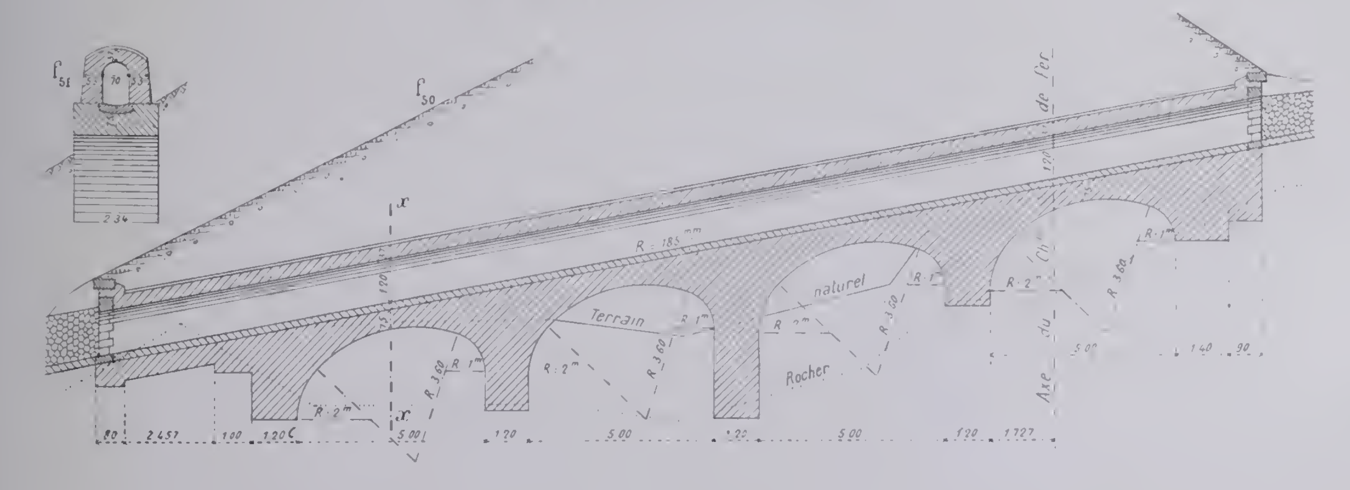
LIGNE DE MOREZ A SAINT-CLAUDE

Aqueduc voûté de 0m70 d'ouverture

Ponceau voûté de 1m50 d'ouverture

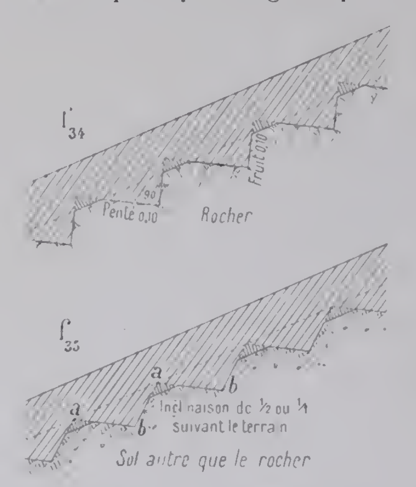


Aqueduc voûté de 0m70 d'ouverture



6° — Il conviendra quelquefois de réunir, par une voûte dont l'extrados forme radier, les fondations des deux pieds-droits.

7° — Dans les terrains en pente, on accroche très solidement l'ouvrage au sol par des redans, pour qu'il ne glisse pas.



Ne faire des redans que dans les terrains à peu près incompressibles.

Ne pas les faire trop hauts, afin d'éviter des fissures résultant de tassements inégaux.

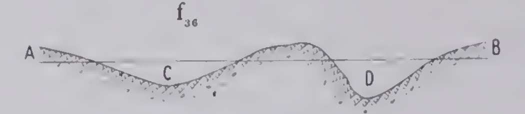
On disposera les redans :

comme au croquis (f_{34}) si l'on est sur rocher ;

comme au croquis (f_{35}) si l'on n'est pas sur rocher.

8° — Il ne faut pas placer systématiquement le radier des ouvrages au niveau du fond du lit des cours d'eau, même quand ce lit est tout à fait plat ; d'abord, parce qu'en général les terres de surface sont moins résistantes et plus compressibles ; ensuite, parce qu'il y a tout avantage à faire aboutir les eaux, tout au moins à l'aval de l'ouvrage, dans un fossé d'un peu de profondeur pour les y concentrer, et les empêcher de s'éparpiller à la surface du sol. Il n'y a évidemment pas de règle générale pour la profondeur des fossés d'amont et d'aval ; à moins de circonstances locales spéciales, on peut admettre 0m25 à 0m30 pour un ouvrage de 0m60 ; 0m30 à 0m40 pour un aqueduc de 1m, etc...

9° — Il peut arriver qu'un radier AB (f_{36}), tout en ayant ses extrémités A et B assez enfoncées dans le terrain naturel, soit en remblai au-dessus de trous C et D. On peut accepter cette disposition en remplissant les trous, soit de pierres sèches rangées à la main, soit de gravier pilonné arrosé d'un lait de chaux, ou, plus simplement, de terre pilonnée ; mais il vaut mieux, en général, enfoncer le radier au-dessous des trous



10° — Dans les ouvrages à radier, la profondeur des parafouilles dépend de la vitesse des eaux, de leur rétrécissement sous l'ouvrage, et de l' « affouillabilité » du terrain.

11° — Il y a généralement avantage, pour les ouvrages sur torrents, à tenir le radier en contre-bas du lit actuel, de 0m50 à 0m80 suivant les cas ; les apports ont vite comblé le dessus du radier et le garantissent ; dans ce cas, on augmentera la hauteur des pieds-droits de la hauteur présumée des apports.

12° — Dans les alluvions très meubles à grandes déclivités, le radier général doit être défendu, à l'amont et à l'aval, par un parafouille s'étendant entre les bouts des deux murs en aile, avec une profondeur dépendant de l' « affouillabilité » du lit, de la pente, de l'étranglement sous l'ouvrage, etc... (en général de 2m à 5m).

Dans ces terrains, les radiers sont souvent affouillés par l'aval, il faut défendre l'aval par des enrochements.

A l'abri de ces parafouilles, il est inutile, sauf en mauvais terrain, d'enfoncer les culées en contre-bas du radier.

13° Quand le radier et le lit à l'aval ont peu de pente, et que les eaux charrient, il y a quelquefois, pour les aqueducs de 0m60 à 1m00, avantage, pour éviter les obstructions par l'aval, à tenir l'aval du radier en contre-haut du lit, de 0m40 à 0m50.

CHAPITRE XIII

PRINCIPALES DIMENSIONS ET DISPOSITIONS DES OUVRAGES DE 8m ET AU-DESSOUS

Les dessins, les dimensions, les matériaux, sont donnés au Titre II :

CHAPITRE XIV

DESSINS A PRODUIRE

Art. 1. — Nomenclature.

1° — Plan au 1/500e (0m002) avec courbes de niveau de mètre en mètre, mais sans cotes, s'étendant assez loin de part et d'autre de l'ouvrage pour s'assurer que la direction est bonne, que les eaux y entrent bien, en sortent bien.

Il pourra, dans certains cas, être supprimé pour les ouvrages de moins de 1m00 : on se contentera alors des indications du plan de travaux à 1/1.000.

2° — Profil en long au 1/500e pour les hauteurs et les longueurs. Il sera prolongé de ce qu'il faut, à l'amont et à l'aval ; il donnera la cote de la plate-forme sur l'axe, la longueur totale de l'ouvrage, les cotes du terrain naturel et du lit, les pentes de l'ouvrage et du lit.

3° — Coupe en long de l'ouvrage avec les sondages.

4° — Demi-plan, les maçonneries découvertes, et demi-plan au niveau des fondations, limités à l'axe parallèle aux pieds-droits.

5° — Elévation amont, élévation aval.

6° — Une coupe en travers avec indication du terrain, — ou plusieurs coupes en travers, si, en raison de la surcharge du remblai, il y a des épaisseurs différentes.

7° — Détails au 1/20e aussi restreints que possible.

Ne rien mettre d'inutile sur les dessins.

Ne pas tracer les lits des voussoirs, ne pas dessiner de moellons ordinaires, ne faire aucune projection de coupe en pointillé...

Art. 2. — Echelles.

Pour les ouvrages de 3m et au-dessus, la coupe en long (3°), les demi-plans (4°), les élévations et coupes (5° et 6°) seront à l'échelle de 1/100e.

Pour les ouvrages de moins de 3m, les élévations (5°) et coupes (6°) seront au 1/50e.

La coupe en long (3°) et les deux demi-plans (4°) qui sont toujours à la même échelle seront en général au 1/50e ; s'ils étaient trop grands, au 1/100e.

TITRE II

DESSINS — TABLEAUX

CHAPITRE I

OUVRAGES SOUS RAILS EN PLEIN CINTRE

§ 1. — *COUPE EN TRAVERS*

Art. 1. — Dispositions d'ensemble

e_0, **E** *et* **R** *sont donnés au Tableau I* (p. 33) ;
Δe *au Tableau II* (p. 34).

f_1. — Ouvrages dits sans surcharge, c-à-d sous une charge h' ne dépassant pas 3m.

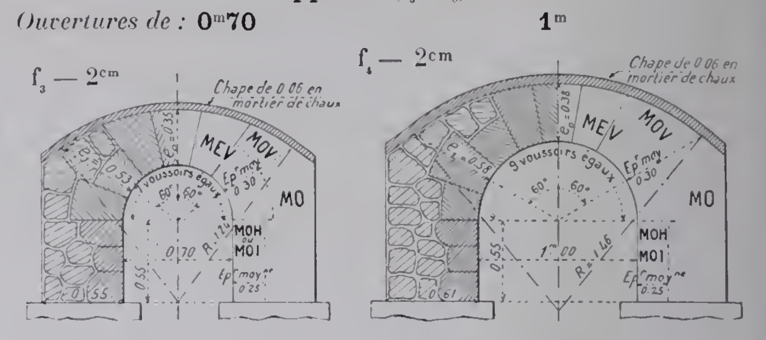
f_2. — Ouvrages dits avec surcharge, c-à-d sous une charge h' de plus de 3m.

Dessus du rail le plus bas
Plate-forme
$3^m \geq h' \geq 0^m40$ ¹
Pour les chapes, voir f_3 à f_8 et Titre I, p. 20 et 26
$h' > 3^m00$

1. — Pour la réduction exceptionnelle de h' à moins de 0m40, voir Titre I (p. 21).

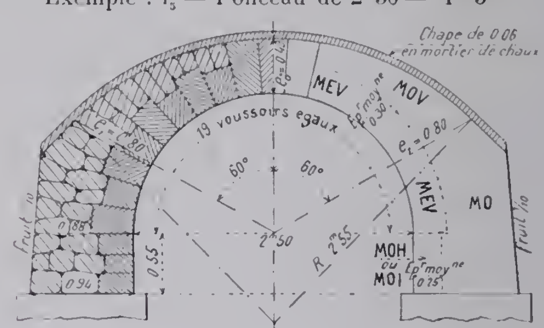
Art. 2. — Corps des voûtes et pieds-droits. Appareil (f_3 à f_8)

Ouvertures de : **0m70** **1m**



Ouvertures de : **1m50** **2m00** **2m50**

Exemple : f_5 — Ponceau de 2m50 — 1cm5

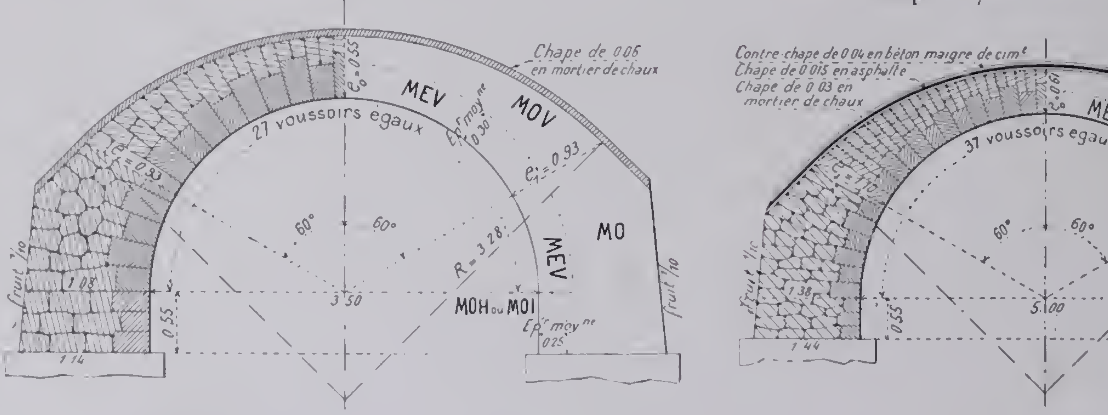


Ouvertures de : **3m00** **3m50**

Exemple : f_6 — Ponceau de 3m50 — 1cm5

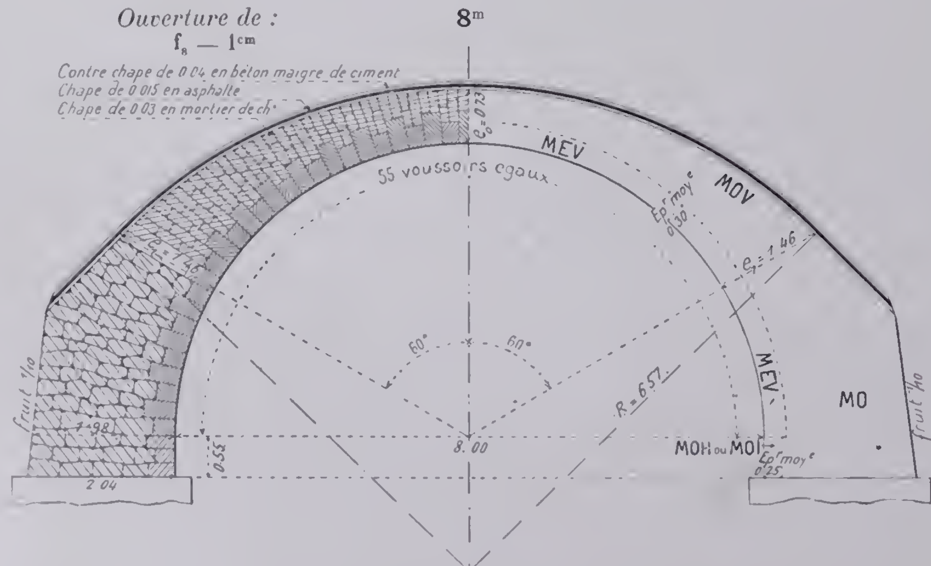
Ouvertures de : **4m00 à 7m50**

Exemple : f_7 — Pont de 5m — 1cm



Ouverture de : **8m**

f_8 — 1cm



NOTA

La moitié de gauche de chaque figure montre comment l'ouvrage sera réellement exécuté. — La moitié de droite indique comment les différentes natures de matériaux seront indiquées et représentées au projet sur la coupe en travers.

Ces coupes supposent que la hauteur des pieds-droits est réduite au minimum de 0m55 (p. 10) et que la charge de remblai au-dessus de la chape est $\leqslant 3^m$.

Pour le sens de MO, MOV,... voir Titre I, (p. 26).

Art. 3. — Dimensions. — Tableau I. — *Ouvrages sans surcharge ou sous une charge ne dépassant pas 3*^{m} (Voir f_1)

Ouverture	Epaisseur à la clef $e_o = 0{,}19\,(1+\sqrt{2a})$	Rayon d'extrados $R = 0{,}73\,(1+2a)$	Epaisseur au milieu de la montée	Epaisseur des pieds-droits de hauteur h à $\frac{h}{2}$ des naissances :[2] $E_m = 0^m30 + 0{,}40\,a + 0{,}20\,h$	Distance verticale entre la plate-forme et le dessous de la clef[3]	Revanche minima au-dessus des plus hautes eaux: du dessous de la clef	Revanche minima au-dessus des plus hautes eaux: de la plate-forme[3]	Ouvrages servant à l'écoulement des eaux — Hauteurs sous réserve d'assurer dans tous les cas la revanche nécessaire au-dessus des hautes-eaux: sous clef, minima	sous clef, MAXIMA	des pieds-droits, minima $H_m - a$	des pieds-droits, MAXIMA $H_M - a$	sous plate-forme, minima[3]	sous plate-forme, MAXIMA	Ouvrages servant de passage — Hauteurs: sous clef, minima	sous clef, MAXIMA	des pieds-droits, minima $H'_m - a$	des pieds-droits, MAXIMA $H'_M - a$	sous plate-forme, minima[3]	sous plate-forme, MAXIMA
$2a$	e_o	R	e_1	E_m	d	r	$r+d$	H_m	H_M	h_m	h_M	H_m+d	H_M+d	H'_m	H'_M	h'_m	h'_M	H'_m+d	H'_M+d
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m 0.60	m 0.34	m 1.17	m 0.51	m 0.42 + 0.20 h	m 0.80	m 0.25	m 1.05	m 0.85	m 1.30			m 1.65	m 2.10	»	»	»	»	»	»
0.70	0.35	1.24	0.53	0.44 + 0.20 h	0.81	0.25	1.06	0.90	1.35			1.71	2.16	»	»	»	»	»	»
1.00	0.38	1.46	0.58	0.50 + 0.20 h	0.84	0.35	1.19	1.05	1.50			1.89	2.34	Passages particuliers pour piétons et bestiaux 2m00				2m84	2m84
1.50	0.42	1.82	0.66	0.60 + 0.20 h	0.88	0.50	1.38	1.30	1.75			2.18	2.63	2.25				3.13	3.13
2.00	0.46	2.19	0.74	0.70 + 0.20 h	0.92	0.60	1.52	1.55	2.00			2.47	2.92	2.50		1m50		3.42	3.42
2.50	0.49	2.55	0.80	0.80 + 0.20 h	0.95	0.70	1.65	1.80	2.25			2.75	3.20	2.75				3.70	3.70
3.00	0.52	2.92	0.86	0.90 + 0.20 h	0.98	0.80	1.78	2.05	2.50	0m55	1m00	3.03	3.48	Chemins ruraux 3.50		2m00		4.48	4.48
3.50	0.55	3.28	0.93	1.00 + 0.20 h	1.01	0.90	1.91	2.30	2.75			3.31	3.76	3.75				4.76	4.76
4.00	0.57	3.65	0.99	1.10 + 0.20 h	1.06	1.10	2.16	2.55	3.00			3.61	4.06	Chemin vst ordinaire 5m	5m00	3m00	3m00	6.06	6.06
5.00	0.61	4.38	1.10	1.30 + 0.20 h	1.10	1.20	2.30	3.05	3.50			4.15	4.60	Ch. de grde communon 5	5.50	2.50	3.00	6.10	6.60
6.00	0.66	5.11	1.23	1.50 + 0.20 h	1.15	1.30	2.45	3.55	4.00			4.70	5.15	» »	»	»	»	»	»
7.00	0.69	5.84	1.34	1.70 + 0.20 h	1.18	1.40	2.58	4.05	4.50			5.23	5.68	Rte Dépte 5	6.50	1.50	3.00	6.18	7.68
8.00	0.73	6.57	1.46	1.90 + 0.20 h	1.22	1.50	2.72	4.55	5.00			5.77	6.22	Rte Natle 5	7.00	1.00	3.00	6.22	8.22

Si la hauteur maxima (H_M ou H'_M) *ne permet pas de couronner l'ouvrage au niveau de la plate-forme, on adoptera l'ouvrage sous charge de remblai en lui donnant la hauteur minima* (H_m ou H'_m).

2. Pour les ouvrages de plus de 2m, dans lesquels le parement postérieur des pieds-droits n'est plus vertical, mais en fruit de 1/10 (f_1), l'épaisseur des pieds-droits est : aux naissances $E_2 = E_m - 0{,}05\,h$; à la base : $E_3 = E_m + 0{,}05\,h$.
3. On a supposé, ce qui est le cas général, que le dessus de la chape est à 0m40 au-dessous de la plate-forme.

Art. 3. — Dimensions *(Suite)*. — TABLEAU II. — *Ouvrages sous charge de plus de* 3m. (Titre I, p. 16 et f_8)

Ouverture 2 a	Quantité Δe, en centimètres, à ajouter à l'épaisseur à la clef e_0 et au rayon R, pour une hauteur de surcharge h' jusqu'à la plate-forme, de :												
	3m au plus	4m au plus	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m	12m	14m	16m	18m	20m et au-dessus
0m60 et 0m70	0cm	1cm	2cm	3cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm				
1m00	0	1	2	3	4	5	7	8	9	10	Pour 12m et au-dessus			
1m50 et 2m00	0	1	3	4	5	6	8	10	12	13				
2.50 et 3.00	0	1	3	5	7	9	11	13	15	16	17cm	Pour 14m et au-dessus		
3.50 et 4.00	0	2	5	7	10	12	14	16	18	20	21			
5m00	0	2	6	9	12	15	17	19	21	23	24	25cm	Pour 16m et au-dessus	
6.00	0	3	7	10	13	16	19	22	24	26	27	28		
7.00	0	3	8	12	16	19	22	25	27	29	30	31	32cm	33cm
8.00	0	4	9	13	17	21	25	28	30	32	33	34	35	36

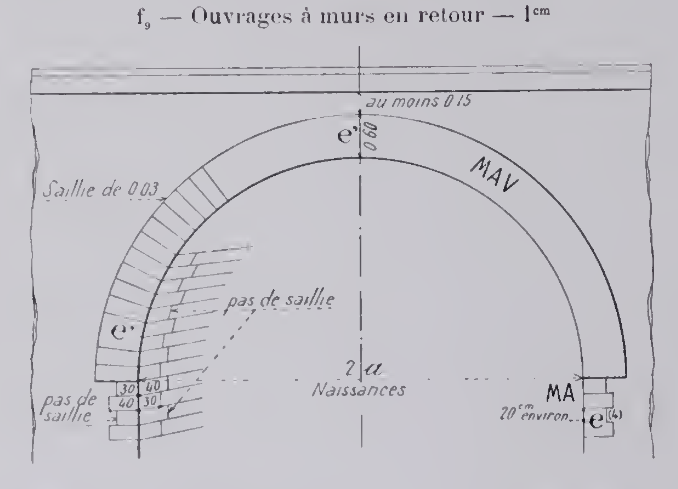
L'épaisseur aux naissances sera majorée de 2 Δe. (Voir f_2).

Mêmes hauteurs minima de pieds-droits que pour les ouvrages non surchargés, c-à-d h_m ou h'_m (Tableau I, colonnes 11 et 17).

§ 2. — *BANDEAUX*

Types. — Dimensions

f_9 — Ouvrages à murs en retour — 1cm



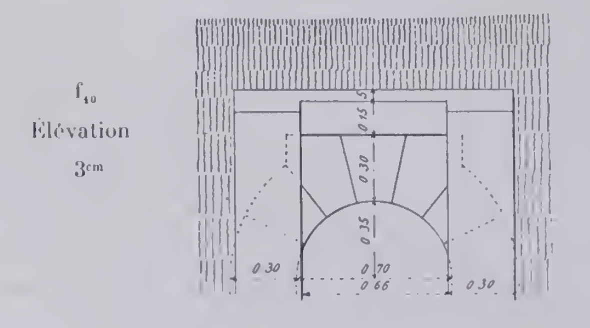
1 — Pour un moellon d'épaisseur e, il convient que sa plus petite longueur soit $\geqslant 1{,}5\,e$, sa plus grande $\leqslant 3\,e$.

TABLEAU III.

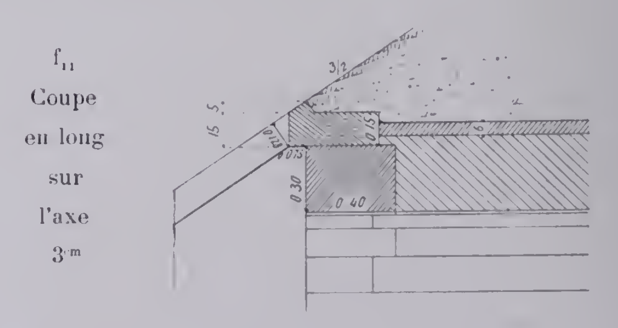
Ouverture 2a	Epaisseur du bandeau e'	Développement de l'intrados	Voussoirs du bandeau		
			Nombre	Epaisseur joints compris	Queues dans le sens de la douelle
0m60	0m30	0m942	5	0m188	0m30 et 0m40
0.70	0.30	1.100	7	0.157	
1.00	0.30	1.571	9	0.175	
1.50	0.30	2.356	13	0.181	
2.00	0.35	3.142	15	0.209	
2.50	0.35	3.927	19	0.207	
3.00	0.35	4.712	23	0.205	
3.50	0.40	5.498	27	0.204	
4.00	0.40	6 283	31	0.203	
5 00	0.45	7.854	37	0.212	
6.00	0.50	9.425	43	0.219	
7.00	0.60	10.996	49	0.224	0m35 et 0m40
8.00	0.60	12.566	55	0.228	0m35 et 0m50

Aqueducs de 0m60 et 0m70 à murs en aile, sous charge de remblai

f_{10} Élévation 3cm



f_{11} Coupe en long sur l'axe 3cm

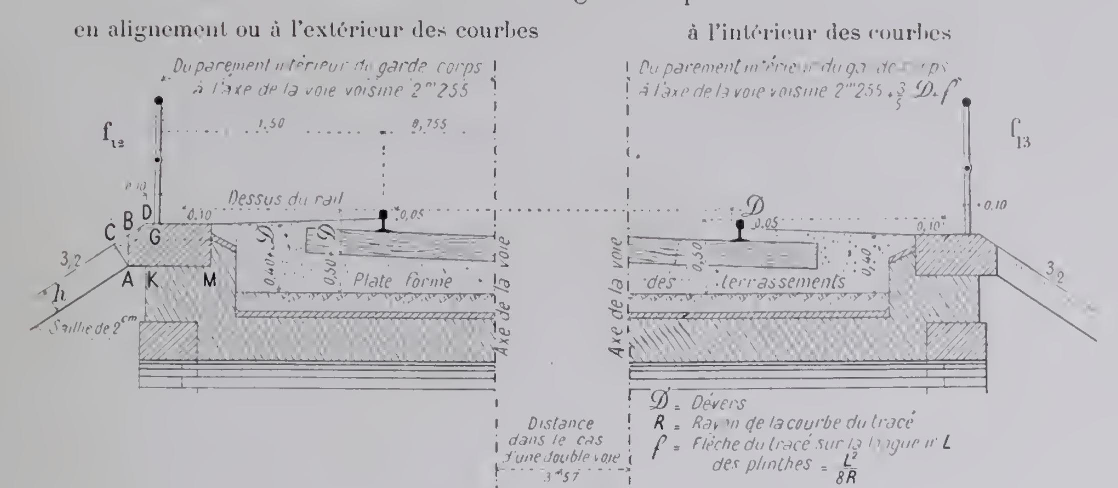


Art. 1. — Plinthes[5] et rampants

A. — *Plinthe à 0m10 au-dessous du rail voisin*

Position des garde-corps

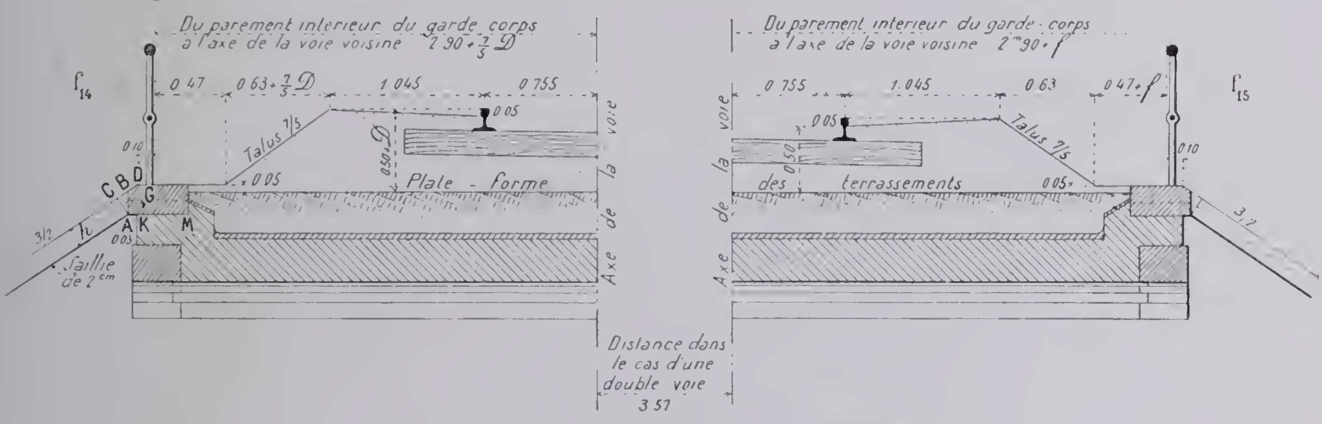
en alignement ou à l'extérieur des courbes — à l'intérieur des courbes



B. — *Plinthe à 0m05 au-dessus de la plate-forme*

Position des garde-corps

en alignement ou à l'extérieur des courbes — à l'intérieur des courbes



C. — *Plinthe sous charge de remblai* (p. 21)

sans garde-corps — avec garde-corps

La plinthe est celle des ouvrages sans surcharge, échancrée sur la hauteur DG. Pour les plinthes sans garde-corps, DG est donné au tableau IV. Pour les plinthes avec garde-corps, DG = 0m12. Dans les 2 cas, MS = AB, PG = 2/3 DG.

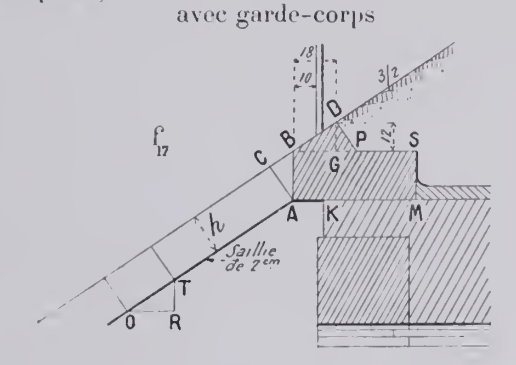


Tableau IV

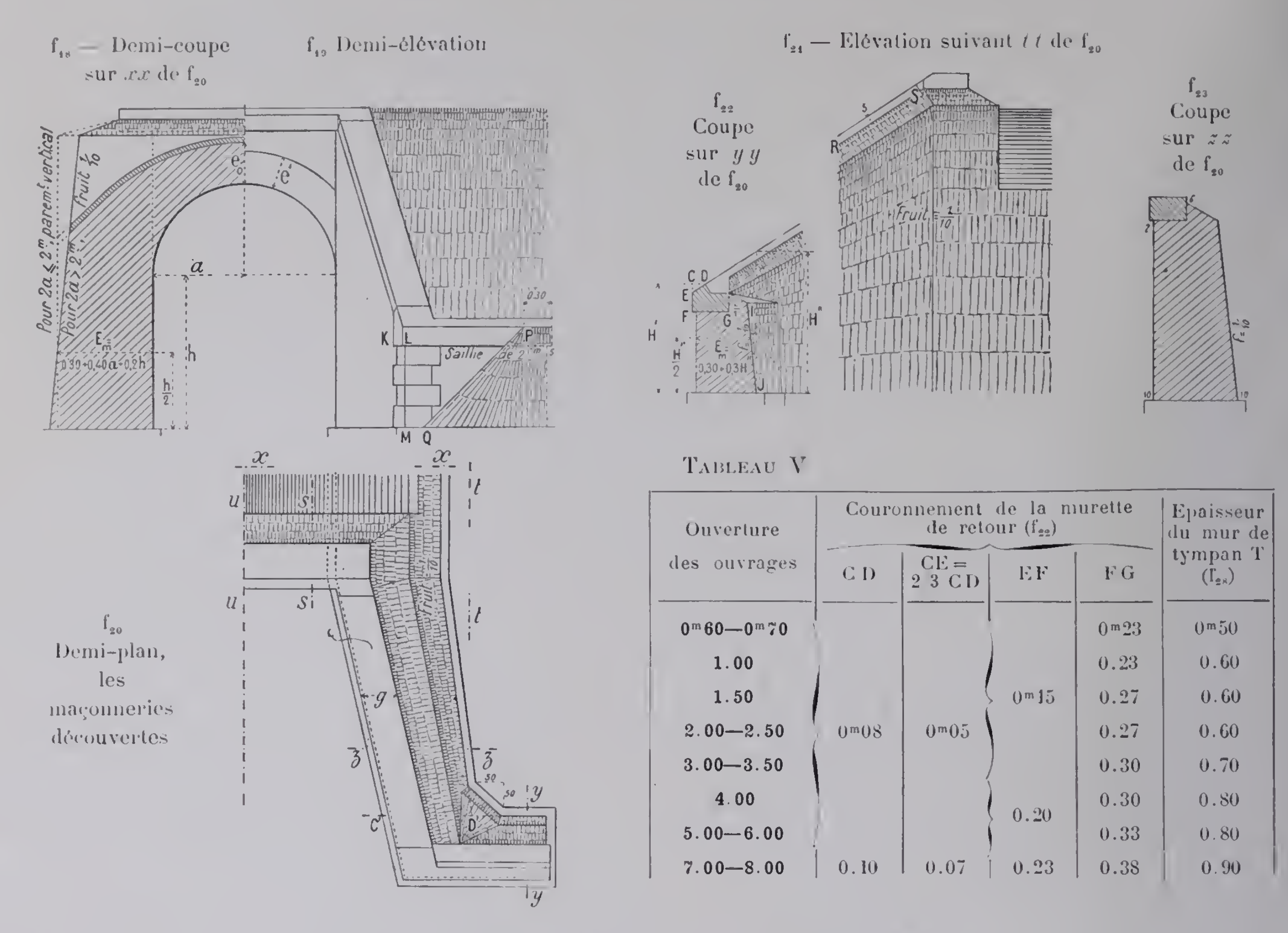
D. — *Dimensions* (f_{12} à f_{17})

Ouverture les ouvrages $2a$	Plinthes — Longueur AM	Saillie AK	AB = 1.202 h	DG = 2/3 AK	BD = 1.202 AK	Epaisseur DK	Rampants — Largeur horizontale g (f_{20})	Epaisseur h	Crossettes[6] — OR 3/2 TR	TR	OT 1.202 OR
0m60—0m70	0m40	0m075	0m15	0m05	0m09	0m20	0m30	0m125	0m25	0m166	0m30
1.00	0.45	0.075	0.15	0.05	0.09	0.20	0.30	0.125	0.25	0.166	0.30
1.50	0.50	0.105	0.18	0.07	0.126	0.25	0.40	0.15	0.30	0.20	0.36
2.00—2.50	0.50	0.105	0.18	0.07	0.126	0.25	0.40	0.15	0.30	0.20	0.36
3.00	0.55	0.12	0.20	0.08	0.144	0.28	0.45	0.166	0.35	0.233	0.42
3.50	0.55	0.12	0.20	0.08	0.144	0.28	0.45	0.166	0.35	0.233	0.42
4.00	0.55	0.12	0.20	0.08	0.144	0.28	0.45	0.166	0.35	0.233	0.42
5.00—6.00	0.60	0.15	0.22	0.10	0.18	0.32	0.45	0.18	0.35	0.233	0.42
7.00—8.00	0.60	0.15	0.25	0.10	0.18	0.35	0.50	0.21	0.40	0.266	0.48

5. — En courbe, les plinthes et les têtes des ouvrages à murs en aile seront droites et parallèles à la corde de la courbe du tracé sur la longueur des plinthes. Les distances à l'axe de la voie indiquées aux figures f_{12} à f_{15}, sont mesurées sur l'axe transversal de l'ouvrage.

6. — Si la hauteur du rampant est entre 1m50 et 3m00, une crossette ; au delà, une par chaque 1m50 de hauteur. — On traitera le parement OTR comme le reste du mur.

Art. 2. — Murs avec murettes de retour



f_{18} — Demi-coupe sur *xx* de f_{20}

f_{19} Demi-élévation

f_{20} Demi-plan, les maçonneries découvertes

f_{21} — Élévation suivant *tt* de f_{20}

f_{22} Coupe sur *yy* de f_{20}

f_{23} Coupe sur *zz* de f_{20}

Tableau V

Ouverture des ouvrages	Couronnement de la murette de retour (f_{22}) CD	CE = 2/3 CD	EF	FG	Epaisseur du mur de tympan T (f_{24})
0m60—0m70				0m23	0m50
1.00				0.23	0.60
1.50			0m15	0.27	0.60
2.00—2.50	0m08	0m05		0.27	0.60
3.00—3.50				0.30	0.70
4.00			0.20	0.30	0.80
5.00—6.00				0.33	0.80
7.00—8.00	0.10	0.07	0.23	0.38	0.90

Le talus du quart de cône PQ (f_{19}) sera de 3/2. En le gazonnant, on pourra le raidir à 1/1.

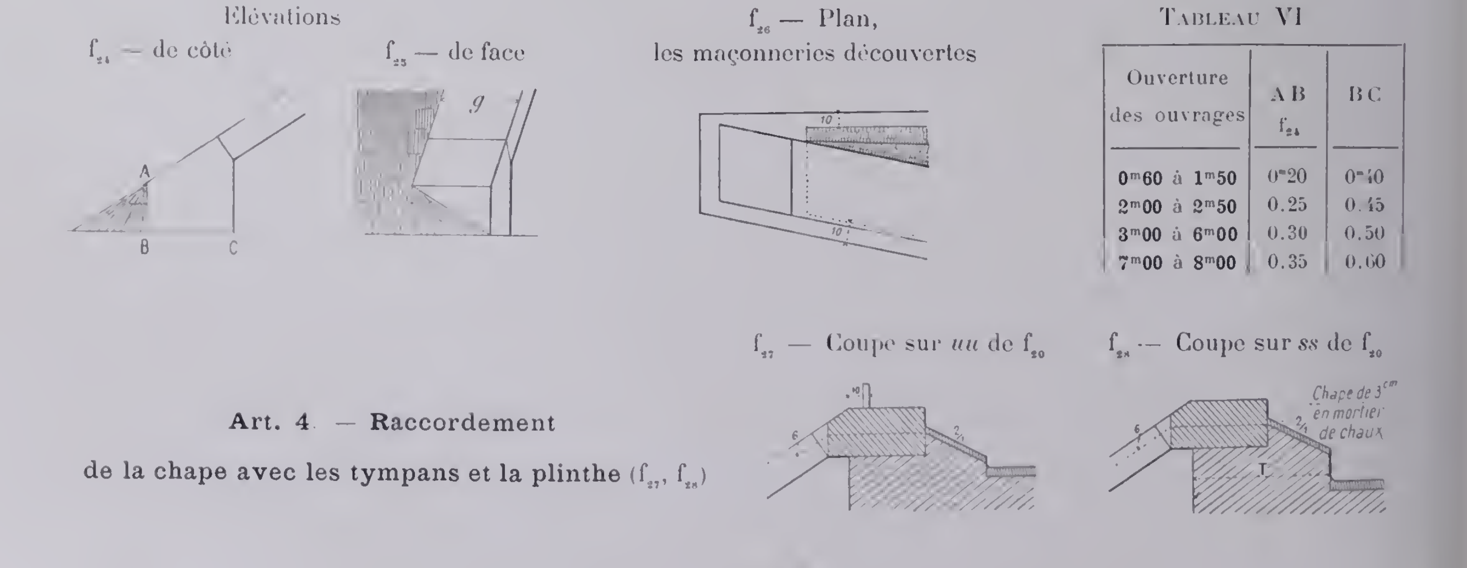
Les moellons d'appareil de la chaîne d'angle LM (f_{19}) auront, pour les ouvrages de 0m60 à 6m, 0m30 et 0m40, — de 7m et 8m, 0m35 et 0m45. L'about du dé KL (f_{19}) aura la même queue que les moellons les plus longs de la chaîne d'angle.

Si l'on doit gazonner le talus, l'arête supérieure RS (f_{21}) du mur en aile sera à 0m10 au lieu de 0m05 en contre-bas du dessus du rampant.

Le parement IJ (f_{22}) sera vertical : 1° pour les ouvrages de 2m et au-dessous ; 2° quand la hauteur H' ne dépasse pas 2m.

L'épaisseur moyenne du mur en aile dans la section C' D' (f_{20}) passant par le pied du parement arrière du mur en retour sera calculée par la formule : $E_m = 0^m30 + 0^m30\ H''$, H'' (f_{22}) étant la hauteur du mur en aile dans la section C' D'.

Art. 3. — Murs avec dés au lieu de murettes de retour



Élévations

f_{24} — de côté

f_{25} — de face

f_{26} — Plan, les maçonneries découvertes

Tableau VI

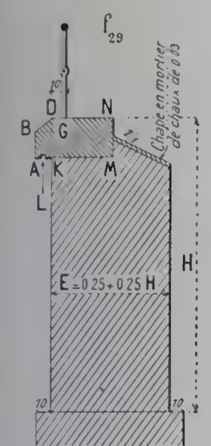
Ouverture des ouvrages	AB f_{24}	BC
0m60 à 1m50	0m20	0m40
2m00 à 2m50	0.25	0.45
3m00 à 6m00	0.30	0.50
7m00 à 8m00	0.35	0.60

f_{27} — Coupe sur *uu* de f_{20}

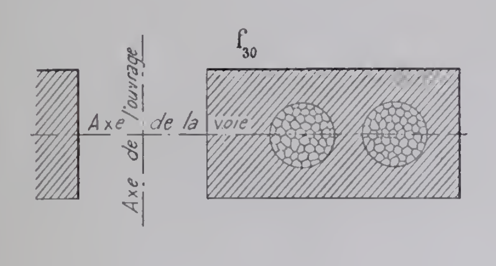
f_{28} — Coupe sur *ss* de f_{20}

Art. 4. — Raccordement de la chape avec les tympans et la plinthe (f_{27}, f_{28})

Art. 1. — Tracé. — Arasement. — Position des garde-corps. — Pour les ouvrages courants, on n'adoptera qu'exceptionnellement les murs en retour (p. 11). — En courbe, les plinthes, têtes, murs en retour, seront courbes et parallèles à la courbe du tracé (p. 22). — Pour les ouvrages couronnés au niveau du rail ou au niveau de la plate-forme, les plinthes seront arasées, et les garde-corps disposés comme pour les murs en aile (voir f_{12} à f_{15}), sauf que, les plinthes étant courbes, il n'y aura pas à tenir compte de la flèche f du tracé sur la longueur des plinthes (p. 22).



Art. 2. — Coupe en travers. — Quand les murs ne seront pas fermés par une cloison du côté des terres, on leur donnera l'épaisseur : $E = 0^m25 + 0{,}25\ H$ (f_{29}).



Toutefois, l'intervalle entre parements intérieurs des murs en retour d'une même culée ne devra pas descendre au-dessous de 2^m.

Quand la hauteur H atteindra 4 ou 5^m, et même, dans certains cas, pour des hauteurs moindres, on évidera la culée, soit par des puits circulaires remplis de déblais rocheux (f_{30}), soit par des voûtes d'évidement transversales, ... : ces dispositions feront l'objet d'une étude spéciale.

Art. 3. — Plinthe (f_{29}).

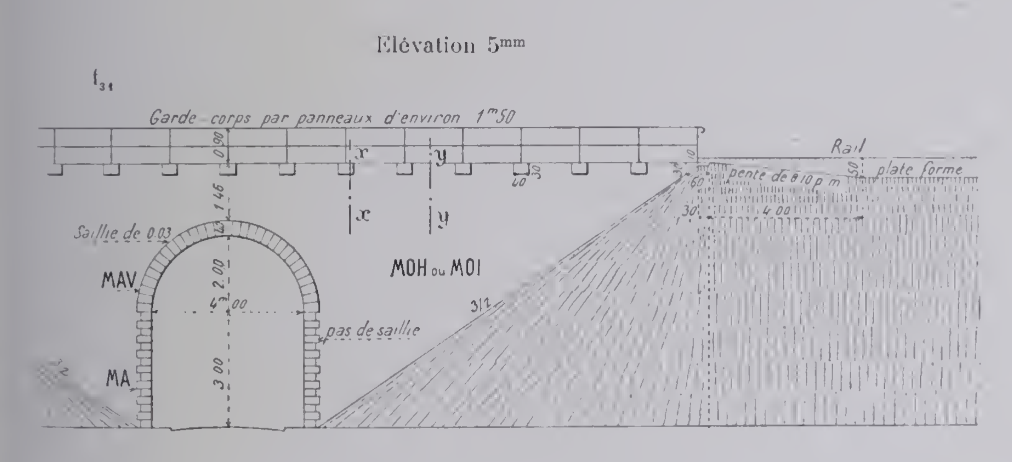
TABLEAU VII

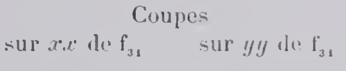
Ouverture des ouvrages	Longueur AM	Saillie AK	Epaisseur MN	AB	DG	BG=2DG	
Jusqu'à 2^m inclus	0^m50	0^m10	0^m25	0^m18	0^m06	0^m12	Pour les ouvrages de plus de 2^m, on creusera un larmier L (f_{29}).
De 2^m à 6^m inclus	0.60	0.15	0.30	0.21	0.08	0.16	
De 6^m à 8^m	0.70	0.20	0.35	0.25	0.10	0.20	

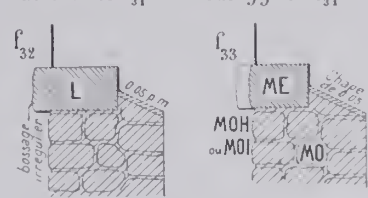
Art. 4. — Couronnement des ouvrages courants en rase campagne

Exemple. — Passage inférieur voûté de 4^m

Élévation 5^{mm}




Coupes
sur xx de f_{31} sur yy de f_{31}



Face supérieure des dés arasée aux mêmes niveaux que les plinthes des ouvrages à murs en aile couronnés au niveau du rail ou de la plate-forme (p. 21).

Il convient que la verticale de la clef coïncide avec le milieu d'un panneau du garde-corps, à défaut, avec un montant.

§ 5. — *RADIERS*

Art. 1. — Coupe en travers

TABLEAU VIII

Ouverture $2a$	Flèche f	Epaisseur g
0^m60 - 0^m70	0^m05	0^m35
1^m00 - 1^m50	0.075	0.35
2.00	0.10	0.40
3.00 - 3.50	0.125	0.40
4.00	0.15	0.45
5.00	0.175	0.50
6.00 - 7.00	0.20	0.55
8.00	0.25	0.60

Art. 2. — Garde-radiers. — Parafouilles

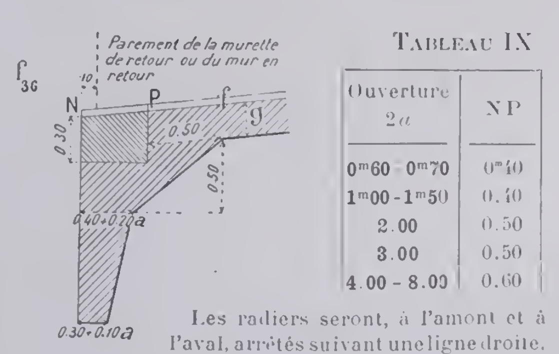


TABLEAU IX

Ouverture $2a$	NP
0^m60 0^m70	0^m40
1^m00 - 1^m50	0.40
2.00	0.50
3.00	0.50
4.00 - 8.00	0.60

Les radiers seront, à l'amont et à l'aval, arrêtés suivant une ligne droite.

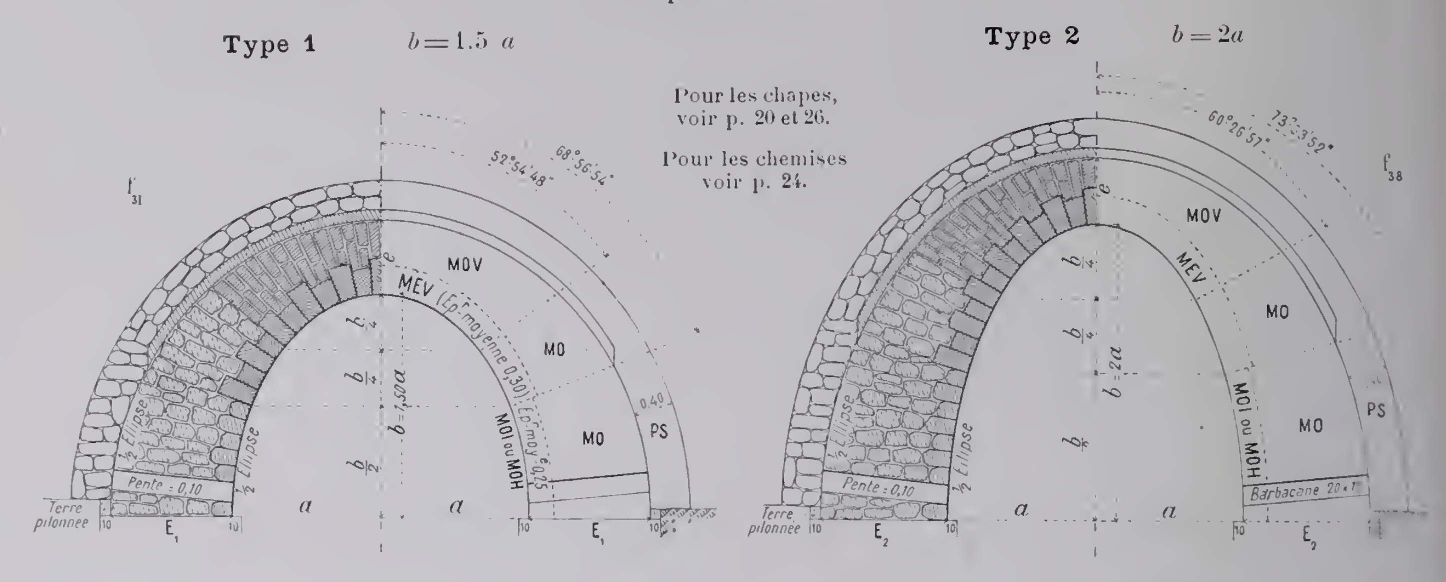
OUVRAGES DROITS SOUS RAILS EN ELLIPSE SURHAUSSÉE

PORTÉE DE 2^m ET PLUS — SURCHARGE DE PLUS DE 5^m

(Titre I, p. 15)

§ 1. — *CORPS*

Coupe en travers



Pour les chapes, voir p. 20 et 26.

Pour les chemises voir p. 24.

Epaisseurs
$$\begin{cases} e = e_0 + \Delta e \\ E_1 = e_0 + 0{,}2a + 2\,\Delta e \\ E_2 = e_0 + 0{,}3a + 2\,\Delta e \end{cases}$$

Pour les matériaux, voir p. 26.

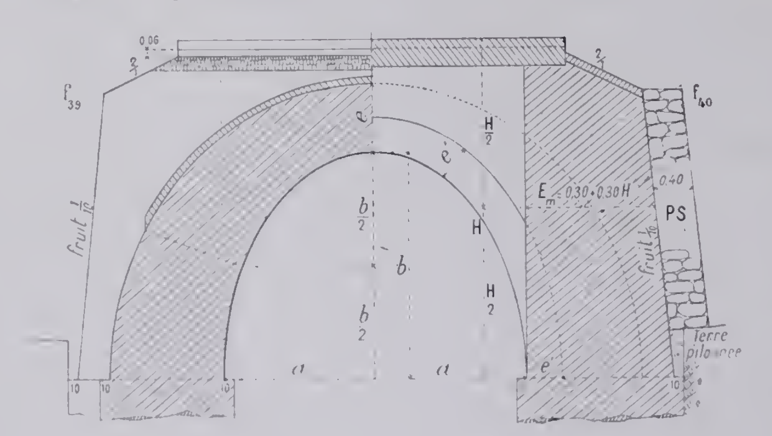
On donne les valeurs numériques de :

$e_0 = 0{,}19\ (1 + \sqrt{2a})$ .... Tableau I, p. 33.

Δe, surépaisseur à la clef........ Tableau II, p. 34

§ 2. — *TÊTES*

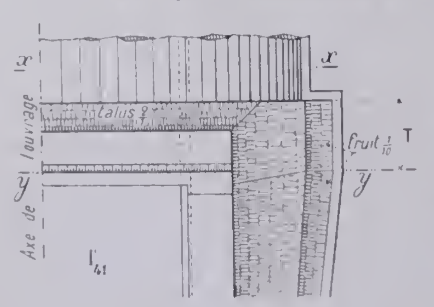
Demi-coupe sur *xx* de f_{41} Demi-coupe sur *yy* de f_{41}



L'extrados du bandeau est une courbe parallèle à l'ellipse.
(Tome III, p. 329).

(f_{41})
L'épaisseur T du tympan est donnée au Chap. I, Tableau V, p. 36.

Plan, les maçonneries découvertes



Bandeaux

Ouverture $2a$	Epaisseur [7] e'	Développement de la demi-ellipse d'intrados — Type 1	Développement de la demi-ellipse d'intrados — Type 2	Nombre de voussoirs — Type 1	Nombre de voussoirs — Type 2	Queue dans le sens de la douelle
2m00	0m35	3m97	4m84	19	25	
2.50	0.35	4.96	6.05	25	29	
3.00	0.35	5.95	7.27	29	35	0m30 et 0m40
3.50	0.40	6.94	8.48	33	41	
4.00	0.40	7.93	9.69	37	47	
5.00	0.45	9.91	12.11	45	57	
6.00	0.50	11.90	14.53	53	65	
7.00	0.60	13.88	16.95	61	75	0.35 et 0.50
8.00	0.60	15.86	19.38	69	85	

Voir pour :

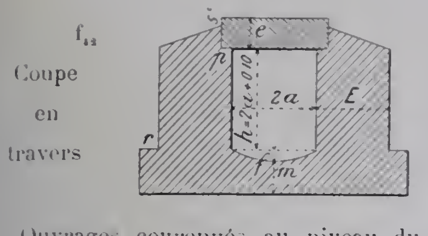
les plinthes, rampants, crossettes. art. 1, p. 35.
les murs en aile, murettes de retour, dés .... art. 2, p. 36.
les radiers .... art. 1, p. 37.
les matériaux autres que ceux du corps de la voûte .... p. 26.

7. La même que pour les pleins cintres (p. 31, Tableau III).

DALOTS

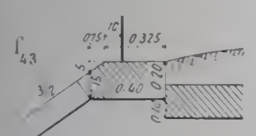
(Voir, p. 13)

f_{42} Coupe en travers

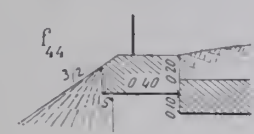


Ouvrages couronnés au niveau du chemin
(coupes en long)

avec murs en aile



avec mur en retour



Ouverture 2a	Epaisseur de la dalle e	Largeur d'appui p	Epaisseur des pieds-droits E	Epaisseur minima du radier m	Flèche du radier f	Retraite de la fondation r
			A. — Sous rails			
0m60	0m25	0m15	0m50	0m35	0m05	0m10
0.70	0.30	0.20	0.55	0.40		
0.80	0.30	0.20	0.60	0.40		
			B. — Hors la voie			
0.20	0.10	0.05	0.30	0.10		
0.30	0.10	0.05	0.30	0.15	0.00	0.05
0.40	0.15	0.05	0.35	0.20		
0.50	0.15	0.10	0.35	0.20		
0.60	0.20	0.10	0.40	0.30		
0.70	0.20	0.10	0.40	0.30	0.05	0 10
0.80	0.25	0.15	0.45	0.30		

Si, exceptionnellement, par exemple pour permettre à un homme de passer, on est obligé de dépasser la hauteur $h = 2a + 0^m10$, on calculera E par la formule : $E = 0^m15 + 0{,}30\ a + 0{,}20\ h$.

On ne mettra de garde-corps que sur les ouvrages de 0m50 et au-dessus, quand la hauteur entre le dessus de la plinthe et le radier dépasse 1m.

En rase campagne, le rampant sera en moellons ordinaires ; la plinthe, en libages sans chanfrein, sans saillie sur la tête.

CHAPITRE IV

BUSES

(Voir p. 13)

CORPS

SOUS RAILS

Coupe en travers

Dimensions

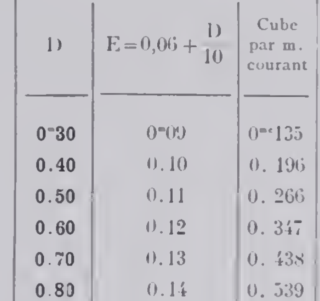
D	a	b	c	d	f	Cube par m. cour[t] B$_1$	Cube par m. cour[t] B$_2$
0m60	0m10	0m10	0m20	0m20	0m11	0mc220	0mc670
0.80	0.11	0.15	0.30	0.25	0.17	0. 314	1. 206

Composition :

B$_1$	B$_2$
Ciment......... 800 k	Mortier de chaux à 300 k........ 1 vol.
Sable et «graville» de 2 cm....... 1 mc	Gravier de 2 cm à 3 cm........ 2 vol.

HORS LA VOIE

Coupe en travers



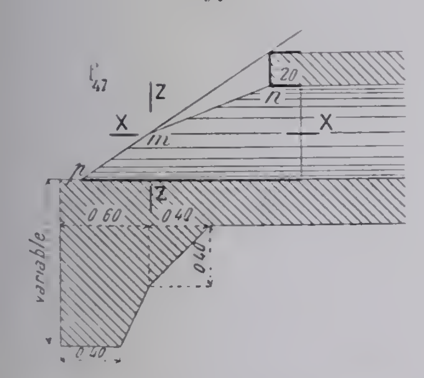
Composition :
Mortier de ciment à 500k 1 vol.
Gravier ou pierre cassée de 3 cm.............. 1 vol.

Dimensions

D	$E = 0{,}06 + \frac{D}{10}$	Cube par m. courant
0m30	0m09	0mc135
0.40	0.10	0. 196
0.50	0.11	0. 266
0.60	0.12	0. 347
0.70	0.13	0. 438
0.80	0.14	0. 539

TÊTES

Type I



Au-dessus du plan XX (f_{47}), la buse est coupée par une droite normale à son axe s'appuyant sur cet axe et sur l'ellipse intersection du plan du talus avec le cylindre d'extrados.[8]

Au-dessous, la tête est dans le plan du talus.

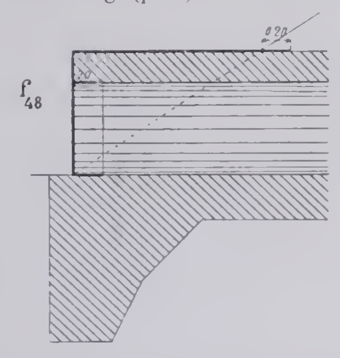
On peut couper par le plan vertical ZZ le bec de flûte $m\ p$.

La tête sera entourée de gazon sur 0m30.

8. L'intersection de cette surface avec le cylindre d'intrados est une ellipse qui se projette sur le plan vertical passant par l'axe de la buse, suivant la droite $m\ n$ (f_{47}).

Type II

Applicable quand la buse est faite par tuyaux pilonnés à côté de l'ouvrage (p. 13).



Quand on ne craindra pas d'affouillements, spécialement pour les buses hors la voie, on réduira le parafouille à un bourrelet de 10cm × 10cm. On pourra même le supprimer.

On garnira d'un enduit au mortier de ciment de 2cm la partie vue de la tête, et, sur 0m20, l'intérieur de la buse et la partie de l'extrados qui sera recouverte de remblai.

OUVRAGES BIAIS SOUS CHARGE DE REMBLAI

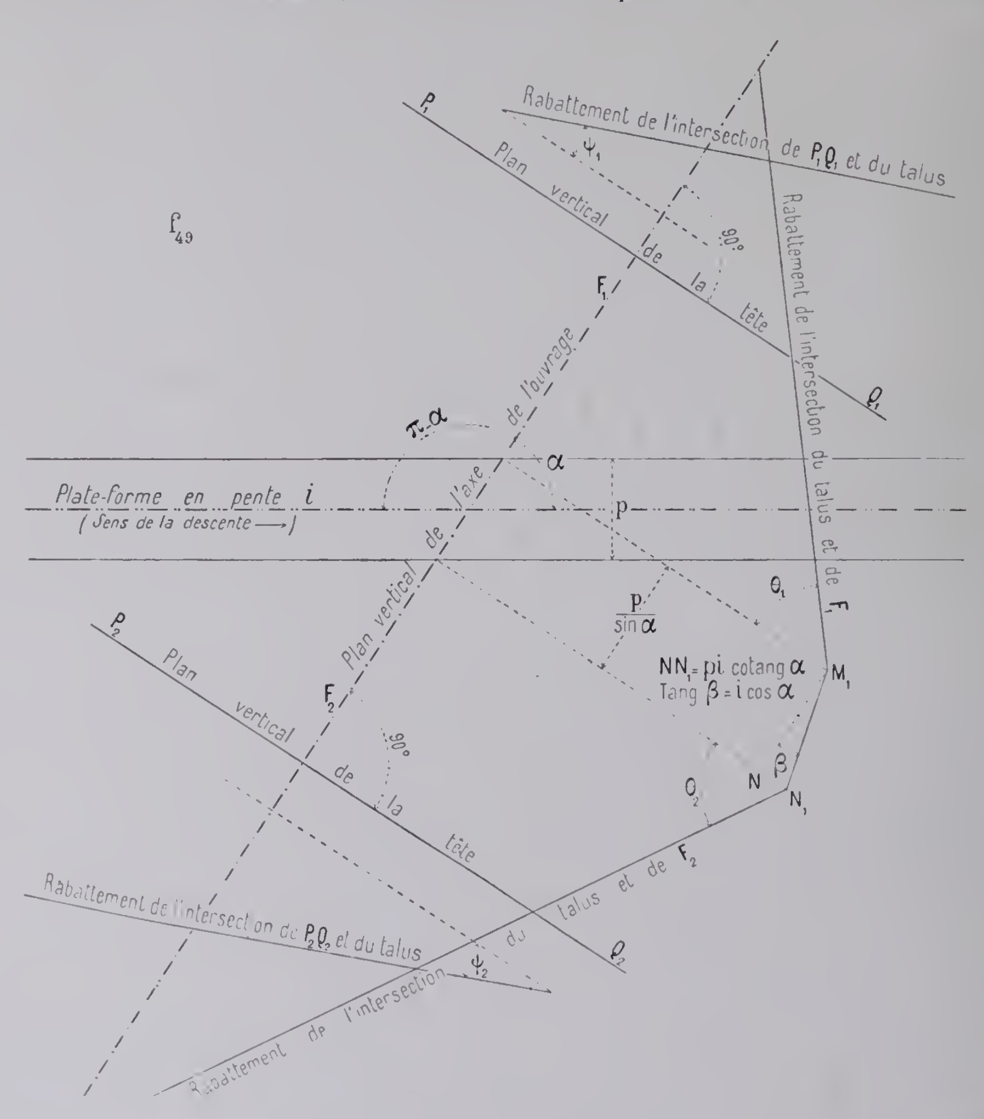
AU TALUS DE 3/2

VOÛTES ET TÊTES DROITES — PLINTHES RAMPANTES

(Voir Titre I, p. 17)

Les têtes sont dans un plan vertical PQ perpendiculaire au plan vertical F de l'axe de l'ouvrage.

L'arête du couronnement d'une tête PQ est l'intersection du plan PQ et du talus de remblai.



Côté	Angle avec le sens de la descente	Angle avec la verticale de l'intersection du talus de remblai et du plan F	Inclinaison sur l'horizon de l'arête rampante, intersection du talus de remblai et du plan de tête PQ
F_1	α (angle aigu)	$\text{Tang } \theta_1 = \dfrac{3}{2\sin\alpha + 3i\cos\alpha}$	$\text{Tang } \psi_1 = \dfrac{2}{3}\cos\alpha - i\sin\alpha$
F_2	$\pi-\alpha$ (angle obtus)	$\text{Tang } \theta_2 = \dfrac{3}{2\sin\alpha - 3i\cos\alpha}$	$\text{Tang } \psi_2 = \dfrac{2}{3}\cos\alpha + i\sin\alpha$

LIVRE II

VIADUCS

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

A ARCHES ÉGALES EN PLEIN CINTRE

A UN SEUL ÉTAGE

TITRE I

VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER

CHAPITRE I

CONDITIONS IMPOSÉES PAR LA CIRCULATION DES TRAINS ET PAR CELLE DES AGENTS

Art. 1. — Pourquoi il faut arrêter d'abord le dessus.

Un pont, un viaduc, sont faits pour la circulation; c'est le dessus qui l'assure: c'est donc lui qui mène l'étude et règle le dessous.

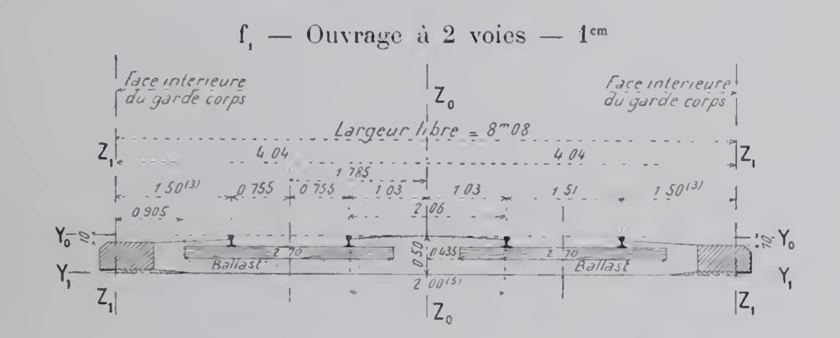
Art. 2. — Largeur libre entre garde-corps.

La largeur libre minima entre les faces intérieures des garde-corps est :

Pour les ouvrages à 2 voies (f_1, f_3) . . . . 8m08[1];

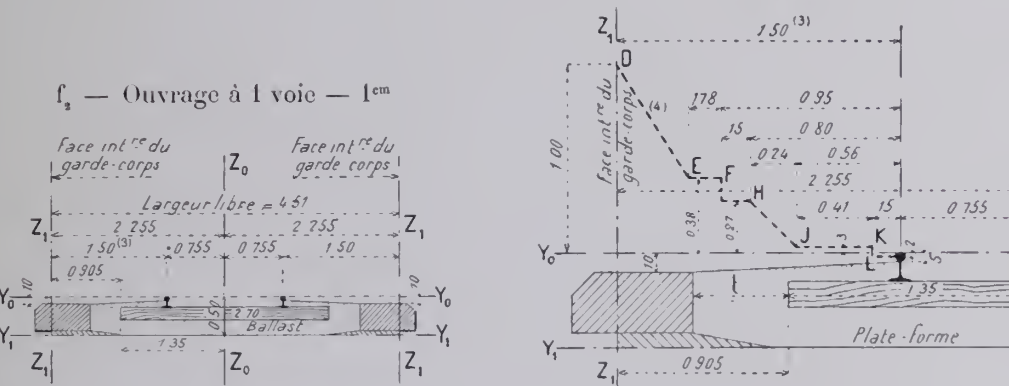
Pour les ouvrages à 1 voie (f_2, f_3) . . . . 4m51[2].

f_1 — Ouvrage à 2 voies — 1cm



f_3 — Détail — 2cm5

f_2 — Ouvrage à 1 voie — 1cm



1. — Au lieu de 8m (Cahier des charges des grandes Cies, art. 11).

2. — Au lieu de 4m50 (Cahier des charges du P-L-M et de l'Orléans, art. 11).

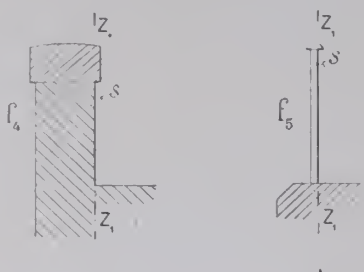
3. — Règlement ministériel du 8 Janvier 1915 pour les ponts métalliques, art. 27).

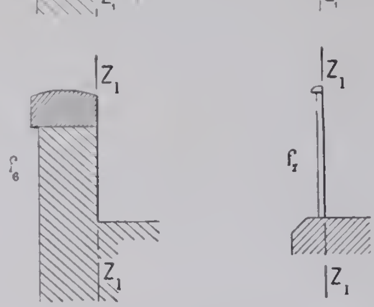
4. — — id — Rien ne doit dépasser la ligne brisée LKJIIFED (f_3).

5. — Cahier des charges des grandes Cies, art 7.

Art. 3. — Pas de saillie du bahut ou de la lisse supérieure, sur la face intérieure du garde-corps.


Toute saillie s (f_4, f_5) sur la face intérieure des gardes-corps élargit l'ouvrage de $2s$.





Un encorbellement, disposé pour la regagner, sera bien mieux employé à réduire la largeur entre tympans.

Rien ne doit faire saillie sur le plan vertical $Z_1 Z_1$ (f_4 à f_7) : ni le bahut d'un parapet en maçonnerie, ni, dans un garde-corps métallique, la main courante, les pontets en fonte....

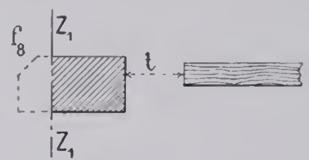
Peuvent toutefois faire saillie sur $Z_1 Z_1$ dans les garde-corps métalliques :

1° les renforts des montants (f_{16}) parce qu'ils n'empiètent pas sur le gabarit de construction (f_3) ;

2° les pilastres en fonte, parce que ce sont des obstacles isolés à plus de 1m35 du bord du rail voisin.[6]

Art. 4. — Distance minima t entre l'about des traverses et la face postérieure de la plinthe (f_8).

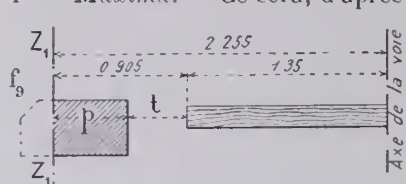
Elle est seulement de 0m155 le long des trottoirs des gares.



Admettons que la distance minima, pour éviter aux plinthes des chocs au passage des trains, soit 0m305[7, 8].

Art. 5. — Largeur p de la plinthe en dedans de la face intérieure du garde-corps $Z_1 Z_1$ (f_9).

1° — *Maxima.* — Ce sera, d'après l'art. 4:



0m905 — 0m305 (minimum de t) = 0m60[9]

0m60 n'est justifié que pour équilibrer un grand porte-à-faux: on ne l'a guère dépassé.

2°. — *Minima.* — La plinthe, en dedans du plan $Z_1 Z_1$, doit être assez large pour :

a — servir de trottoir aux Agents de la Voie. 0m35 suffit à la rigueur[10] : on a souvent pris 0m45.

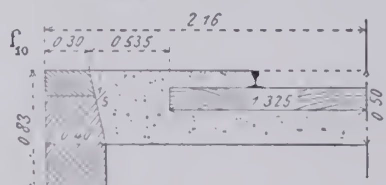
b — faire équilibre au porte-à-faux de la plinthe en avant du tympan.

Entre 0m35 et 0m60, on réduit p à ce qu'il faut pour la stabilité de la plinthe.

Art. 6. — Niches de refuge. Largeur. Profondeur. Place (f_{11}).

Tous les 50m environ de chaque côté de l'axe, soit de 25m en 25m en quinconce, on ménage des niches de refuge de largeur $l \geqslant$ 1m50, de profondeur $c \geqslant$ 0m30. Avec 0m30, un gros homme est à l'abri.

6 — Décision ministérielle du 31 décembre 1890 fixant la distance entre le rail et les obstacles isolés le long des voies principales.



7 — Elle est de : 0m365 aux viaducs de la nouvelle ligne de Paris à Chartres (Etat 1910).

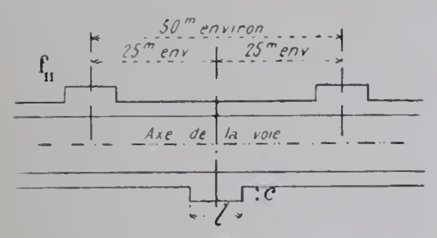
0m355 (traverses de 2m60) au viaduc de Thil ligne de Briey à Hussigny et Villerupt (Est 1905).

8 — Le ballast pousse peu la plinthe.

Sur des lignes du Midi en tranchée de rocher, on le maintenait par une murette de 0m30 en couronne (f_{10}).

9 — Viaducs de la ligne de Vendes à Mauriac (1888).

10 — A côté d'un parapet en maçonnerie de 1m de hauteur, on s'est contenté de 0m22 au viaduc du Blanc (Ligne de Poitiers au Blanc — 1881-85).



On prendra :

$c = 0^m35$ avec un garde-corps métallique ;

$c = 0^m30$ avec un parapet en maçonnerie, qui est lourd et dont il importe de réduire le porte-à-faux.

Suivant la portée des arches, on peut ne mettre de niches qu'à une pile sur deux, sur trois....

C'est l'aspect qui règlera la largeur l au-dessus du minimum de 1^m50, d'après l'ouverture des arches, l'épaisseur des piles, suivant que les tympans sont ou ne sont pas élégis.

Les niches seront toujours au-dessus des piles, jamais au-dessus des clefs des grandes voûtes.

Quand des voûtes d'élégissement traversent les tympans, on continuera à placer les niches au-dessus des grandes piles : elles y sont moins désagréables qu'à la clef des grandes voûtes.

Art. 7. — Dessus des plinthes à 0m10 plus bas que le rail voisin (f_{12}).

Le ballast descend en pente de 0,05 à partir d'un plan passant à 0^m05 au-dessous du plan supérieur des rails Y_0 Y_0.

Le dessus de la plinthe est au-dessous de Y_0 Y_0 de :

$z = 0^m05 + 0,05\,(1^m50 - p) = 0^m125 - 0,05\,p.$

p est généralement 0^m50. Alors $z = 0,10$; il est exceptionnellement (maximum) 0^m60 ; alors $z = 0^m095$.

On arasera toujours la plinthe à 0^m10 au-dessous du rail.

CHAPITRE II

RECONNAISSANCE DU SOL DE FONDATION A L'EMPLACEMENT DU VIADUC

Art. 1. — Quand doit-on faire les sondages ?

A temps pour changer le tracé, si on rencontre de trop mauvais terrains.

Art. 2. — Puits de sondage.

C'est par des puits qu'on reconnait le mieux le sol : on le voit, on le touche, on l'éprouve.[11]

11. — Dans les terrains argileux, mouillés, la surface est une bouillie sans consistance: il ne faut pas s'en effrayer.

Au pont de Peseux, sur le Doubs, fondé à l'air comprimé sur de la marne argileuse, on enfonçait dans cette marne des cubes de 0^m30 de côté à l'aide de vérins pressant contre le plafond de la chambre de travail. (Il ne faut pas opérer sur de petits cubes, qui s'enfoncent tout de suite parce que la terre se soulève tout autour).

Voici ce qu'on a constaté:

Enfoncement en centimètres	Charge par $\overline{0^m01}^2$			
	Culée Lons-le-Saulnier	Pile 1	Pile 2	Culée St Jean-de-Losne
0	1^k94	3^k10	3^k55	3^k
1	3.61	4.60	4.10	4.44
2	4.50	5.70	4.75	5.77
3	4.83	6.80	5 20	7.00
4	5.17	8.50	5.55	8.00
5	5.72	9.60	6.30	9.10

L'ouvrage (métallique) terminé et surchargé, ne pèse pas plus de 5^k5 par $\overline{0^m01}^2$.

Sous l'ouvrage achevé, le sol ne peut pas refluer latéralement parce qu'il est maintenu par le poids des couches supérieures; la pression est réduite par le frottement latéral des massifs de fondation.

Sans doute, l'essai ne dure que quelques minutes et l'ouvrage, lui, pèsera indéfiniment; l'expérience montre que l'on peut conclure de l'un à l'autre.

Si on ne peut pas les foncer par épuisements, on descendra à l'air comprimé[12] un petit caisson en tôle.

Les puits seront, en général, creusés à côté des fondations et non à leur emplacement même, car, comme d'ordinaire ils descendent plus bas, il faut les boucher, ce qui est une dépense inutile ; de plus, dans les terrains un peu compressibles, les maçonneries qui les remplissent forment, sous les massifs de fondation, des points durs qui peuvent les faire casser[13].

Art. 3. — Sondages à la tige.

Quand le sol de fondation est trop bas ou quand il y a trop d'eau, on fait peu de puits parce qu'ils coûtent cher : on achève de le reconnaitre par des sondages à la tige dans des tubes en tôle[14].

Ils n'indiquent guère que l'épaisseur et la nature des couches ; ils renseignent mal sur la quantité d'eau, assez peu sur la résistance[15], surtout des sols argileux[16].

Art. 4. — Nombre et profondeur des sondages.

Il en faut assez, et assez poussés :

1° pour bien définir la nature du terrain sur toute la surface de chaque fondation : le rocher rencontré au milieu peut disparaitre sur une partie de la fouille[17] ;

2° pour représenter sur la coupe en long de l'ouvrage, par des lignes continues, les différentes couches ; quand on fonde par épuisements, il ne faut pas se tromper sur la position

12

Pont	Ligne de	Date	Caissons			Profondeur	Terrains traversés	Prix		
			Nombre	Forme	Dimensions ou diamètre			Total	par m. c^t de descente	par m. c. du volume occupé par les caissons
de Caronte	Miramas à l'Estaque	1904	3	rectangul^re	$2^m \times 2^m 50$	$18^m 40$ 20.40 23.76	vase, argile molle, sablon	74621 fr.	1192 fr.	238 fr. 56
du Marais de Ste-Marie	Frasne à Vallorbe	1911	1	rond	3^m	27.60	vase molle	51193 fr.	1855 fr.	262 fr. 40*
du Prégo-Diéu sur la Durance	Chorges à Barcelonnette	1912	2	ronds	3^m	29.30 30.40	sable, graviers, galets	62670 fr.	1050 fr.	118 fr. 48

* Pour 195^{mc} occupés par le caisson, on a deblayé 542^{mc}.

13. — Dit pour les ouvrages de 8^m et au-dessous (p. 27).

14. — Sondages de $0^m 21$ — Vallée de la Garonne (Ligne de Marmande à Casteljaloux) — 28 sondages — longueur cumulée 451^m (1879) — Prix moyen du mètre courant : dans la terre et sable 26 fr. 58 ; dans les graviers et galets 97 fr. 85 ; dans le « tuf » 64 fr. 62 — en moyenne 65 fr. 65 (Annales des Ponts et Chaussées — février 1883, p. 174).

Au pont de St-Loup sur l'Allier (Ligne de Gannat à La Ferté-Hauterive), profondeur de $4^m 52$ à $33^m 22$ — longueur cumulée $275^m 38$ (1907) — 70 fr. le mètre courant.

15 — On a essayé de s'en rendre compte d'après le nombre de coups de trépan produisant un enfoncement donné.

Terrain traverse | Enfoncement par n coups de trépan | Nombre de coups de trepan
A Tendre
B Mou
C Assez dur
D Très dur
f_{13}

Au pont d'Orléans, (III, p. 255) on traçait une courbe dont les ordonnées étaient les profondeurs, et les abscisses les nombres totaux de coups de trépan depuis le commencement du sondage : la courbe se couche dans un terrain dur, se redresse dans un terrain mou. (f_{13}).

On peut aussi (f_{13}) indiquer par un trait l'enfoncement correspondant à une volée de 50 coups, de 20 coups. Plus les traits sont rapprochés, plus le terrain est dur. Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1893. *Notice sur la Construction d'un viaduc à la traversée du Val de la Loire à Gien* (Ligne de Bourges à Gien) M. Rossignol.

16 — Dans ces sols, le trépan fait une bouillie de terrains souvent suffisamment solides, et on n'amène au jour qu'une boue liquide.

17 — Au viaduc des Crottes (Ligne de Morbier à Morez), deux piles se sont trouvées en porte-à-faux sur la tranche d'un feuillet calcaire relevé verticalement.

(Voir plus loin, renvoi 73, f_{60}).

du sol de fondation : on n'est outillé que pour les profondeurs présumées et on est exposé à ne plus pouvoir épuiser, si on descend plus bas ;

3°. — pour être sûr que la couche de fondation peut porter l'ouvrage et savoir ce qu'il y a dessous.

Les sondages faits à la barre à mine au fond d'une fouille n'y suffisent nullement. On s'assurera donc à l'avance qu'on n'est pas sur une croûte mince cachant une couche compressible[18]; sur un pavage de gros blocs avec de la vase dessous[19]; sur un gros bloc isolé; que dans le rocher calcaire, il n'y a pas de cavernes[20]; que, dans le granit, il n'y a pas de plan de glissement[21]....

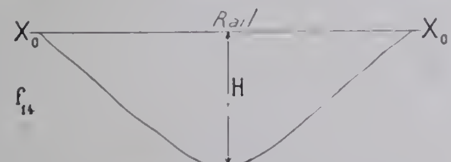
Si on est dans la marne ou dans l'argile, où les sondages ne sont pas chers, on les descendra bien au-delà du niveau probable de la fondation[22].

CHAPITRE III

PREMIÈRES INDICATIONS GÉNÉRALES POUR FIXER L'OUVERTURE ET LE NOMBRE DES ARCHES ET DESSINER UNE SILHOUETTE APPROCHÉE DE L'ÉLÉVATION

Art. 1. — Ouverture commune des arches, $2a$.

Soit H la hauteur du rail au-dessus du point le plus creux de la vallée (f_{14}) sur la face aval du viaduc.



On adoptera pour l'ouverture commune des arches :

$$2\,a = 0{,}4\ H$$

C'est la proportion des beaux viaducs.[23]

18. — Au viaduc de la Gagne (Ligne du Puy à Langogne), les premiers sondages s'étaient arrêtés à une dalle de basalte. Or elle n'avait que 2^{m} d'épaisseur et reposait sur une couche indéfinie d'argile; elle ne couvrait même pas toute la fouille. On a dû renoncer au viaduc en maçonnerie projeté et accepter une travée métallique de 57^{m}, au grand dommage de l'aspect.

19. — Pont sur le Verdon, à Fontgaillarde (Basses-Alpes, — Ligne de St-André à Puget-Théniers).

20. — Pont de Beynac sur la Dordogne (Ligne de Saint-Denis au Buisson, 5 arches de 21^{m}). On trouva, à l'emplacement d'une pile, sous une croûte rocheuse de $0^{m}20$ à $0^{m}70$, un vide ayant jusqu'à 1^{m}. (Annales des Ponts et Chaussées, mars 1881) : *Fondations à l'air libre et à l'air comprimé,* M. Liébeaux).

Pont de Mareuil sur la Dordogne (Ligne de Cahors à Brive, — 7 arches de 23^{m} fondées à l'air comprimé). — En sondant à la barre à mine le rocher de fondation de la pile 2, on découvrit une cavité de 2^{m} à $2^{m}50$ de profondeur, dépassant la pile à l'amont et à l'aval. (Compte-rendu des Travaux p. 26).

Au vieux pont d'Orléans, en novembre 1758, à la 7e pile, il y eut un affaissement $0^{m}50$.

Au pont du Chemin de fer à Orléans (Ligne d'Orléans à Vierzon, — arches de $21^{m}20$ en anse de panier au 1/3), les tassements atteignirent $0^{m}736$. (Revue Générale des Chemins de fer, mars 1890, p. 131 : *Note sur la reconstruction d'une pile du pont sur la Loire, à Orléans,* M. Grippon-Lamothe) ;

Au viaduc du Blanc, sur la Creuse (Ligne de Poitiers au Blanc), on a trouvé sous la pile 13 un trou de plus de 20^{m}. Au fond, on a battu des pieux; puis, dessus, coulé du béton.

21. — Au grand viaduc des Fades sur la Sioule (Ligne de St-Eloy à Pauniat), le coteau rive gauche, sous la charge de la culée et de ses 1/1 de cône, a glissé sur un mince lit d'argile qui coupait le granit à quelque 35^{m} de profondeur.

22. — On a poussé: au pont de Marmande 7 sondages à plus de 27^{m} (Annales des Ponts et Chaussées, février 1883, p. 178); au viaduc de Prégo-Diéu sur la Durance (Ligne de Chorges à Barcelonnette), 3 à 10^{m}.

23

Viaduc	Ligne de	Dates	H	$2a$	$\frac{2a}{H}$
sur l'Aulne, près de Port-Launay	Nantes à Landerneau	1861 - 66	$49^{m}30$	22^{m}	0,44
de Pompadour	Brive - Limoges	1873 - 75	55^{m}	25^{m}	0,45
de St Laurent d'Olt du Piou	Séverac - Marvejols	1877 - 79	$52^{m}68$	20^{m}	0,38
			$46^{m}50$	20^{m}	0,43
de la Crueize	Marvejols - Neussargnes	1879 - 83	$63^{m}30$	25^{m}	0,39
de Mussy	La Clayette - Lamure	1892 - 95	60^{m}	25^{m}	0,41
de la Gascarie	Carmaux - Rodez	1894 - 97	$49^{m}10$	20^{m}	0,41
de Weissenbach	St Gall - Wattwil	1907 - 09	$61^{m}40$	25^{m}	0,41

Avec elle, sur vallées en V bien accentué, l'arche centrale n'est pas trop petite, les arches extrêmes ne sont pas trop grandes.

Mais quand le bas de la vallée est large, plat, il faut s'inquiéter surtout des arches du milieu et alors augmenter l'ouverture.

On l'augmentera si les fondations sont chères, s'il y a un grand creux à franchir.....

Il n'y a pas intérêt à prendre $2a$ sensiblement au-dessous de 0,4 H[24].

Pour les plus hauts viaducs, on n'a guère, jusqu'ici, dépassé 25m.[25, 26]

Art. 2. — Epaisseur de l'ouvrage. Niveau des clefs des intrados (f_{15}).

Au-dessous de l'horizontale du rail $X_0 X_0$, on portera verticalement :

$$h = 0^m95 + 0{,}19\ (1 + \sqrt{2a})^{27}$$

L'horizontale $X_3 X_3$ est la tangente au sommet des arches.

Art. 3. — Première valeur approchée de l'épaisseur des piles aux naissances.

On admettra provisoirement pour toutes les piles :

$$e_2 = 0{,}20\ (2a)$$

Art. 4. — Fruit provisoire des piles en élévation.

Au-dessous de l'horizontale des naissances, $X_4 X_4$, on profilera les piles :

d'abord verticalement sur 0m40 de hautr;

puis avec un fruit de 0,025 (1/40).

Art. 5. — Silhouette de l'élévation sur « calque ».

Avec ces éléments, et des ouvertures variant par mètre autour de 0,4 H, on dessine quelques silhouettes sur « calque ».

On a, auparavant, sur un profil en travers de la vallée à l'emplacement de l'ouvrage, indiqué les cours d'eau, les chemins, le sol de fondation, la plate-forme (ligne rouge).

Sur ce profil, on promène les silhouettes ; on place les piles de façon à les fonder facilement, à bien encadrer le creux, bien franchir la rivière, les chemins.

L'ouvrage doit être bien encadré par ses culées.

Il n'est pas bon que les quarts de cône aveuglent les dernières voûtes : tout au plus, peuvent-ils atteindre leurs naissances.

Au besoin, on augmente l'ouverture ; à l'extrême rigueur, on la diminue un peu.

Avec cette silhouette, on arrête : l'ouverture $2a$; le nombre d'arches ; et, à très peu de chose près, l'emplacement des piles et des culées.

24. — Les ouvertures sont trop petites au viaduc d'Arquejols (Ligne de Langogne au Puy): $\frac{2a}{H} = \frac{15^m}{45} = 0{,}33$.

A celui du Landwasser (Chemins de fer rhétiques), pour H = 66m, on a pris $2a = 20^m$ seulement, mais parce qu'il est en courbe de 100m.

25. — A Saint-Florent (Issoudun à Saint-Florent), la portée est de 30m, mais la hauteur n'est que de 24m70 ; c'est plus un pont qu'un viaduc.

26. — Nous avons projeté le viaduc de Chanteloube, haut de 65m, avec des arches de 27m (Chorges à Barcelonnette).

Sur la ligne à voie étroite de Bevers à Schuls (Chemins Rhétiques Engadine), le viaduc sur le val Püzza a 4 arches de 27m, une hauteur de 53m.

27. — Le produit $\alpha(1+\sqrt{2a})$ est donné, 3e Partie, Table T1, pour $2a$ de 0m60 à 100m, et α de 0,10 à 0,25.

COURONNEMENT

§ I. — *PARAPETS*

Art. 1. — Parapets en maçonnerie.

Les premiers, et la plupart des très grands viaducs de chemins de fer, ont des parapets en maçonnerie.

A. — Ils sont chers.

Ils sont chers, surtout parce qu'ils augmentent la largeur entre tympans.[28]
Un mince garde-corps en métal est d'autant plus économique que l'ouvrage est plus haut.

B. — Plus de parapets pleins.

Les parapets pleins sont lourds : ils écrasent un viaduc qui doit être élancé, ils le font ressembler à un pont-canal.

La plinthe, entre deux surfaces pleines, le tympan et le fût, c'est-à-dire entre deux parements d'aspect peu différent, n'a plus d'autre rôle apparent que d'indiquer à l'œil où est la voie : ce n'est pas assez pour la justifier.

Sur une plinthe, il faut un attique léger, un parapet ajouré : dans nos cathédrales, on ne voit pas de parapet plein au-dessus d'une corniche.

On ne construira donc pas de parapets pleins, mais des parapets ajourés, et seulement pour un très grand ouvrage dans une ville.

Art. 2. — Garde-corps métalliques.

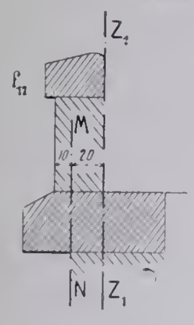
A. — En fer ou en acier.

Pour un petit viaduc entre deux murs de soutènement, on conservera le garde-corps des murs (f_{16}) avec des dés en libages au droit de chaque montant.

Sur le viaduc et les murs, on assurera discrètement le jeu de la dilatation.

Poids par mètre courant = 13 K

28. — Soit MN le nu du tympan (f_{17}).



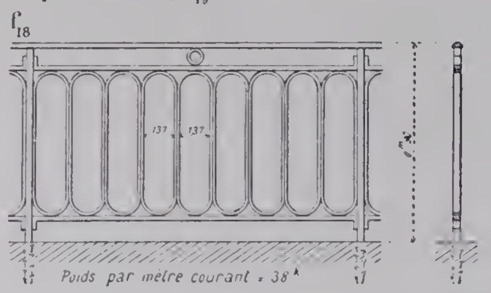
Pour un parapet en maçonnerie de 0m30 d'épaisseur, porté par une plinthe sans corbeaux, la distance entre $Z_1 Z_1$ et MN est d'environ 0m20.

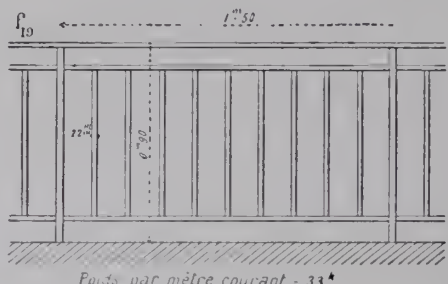
Avec un garde-corps métallique, qui n'a que 0m05 d'épaisseur (au lieu de 0m30), qui ne pèse que 30 ou 40k au mètre courant (au lieu de 600 ou 700k), on peut faire coïncider les plans MN et $Z_1 Z_1$, et même faire déborder un peu le plan $Z_1 Z_1$ par rapport au plan MN.

On gagne donc au moins 0m20 à chaque tête, soit en tout 0m40 de largeur pour toute l'élévation de l'ouvrage.

Sur un viaduc comme celui de Port-Launay, qui a en élévation une surface de plein de 4570mq, c'est une économie de cube de 1828mc, soit, à 40 fr. le mc., 73.120 fr.

S'il n'y a pas de murs aux abords, on appliquera sur les viaducs courants le type f_{18} ; à défaut et pour varier, f_{19}[29].





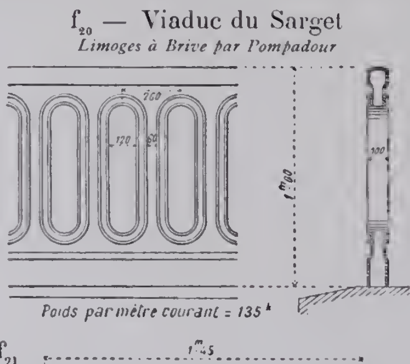
Dans les gares et aux abords, à moins de 200m en avant et 150m en arrière du milieu des trottoirs, la hauteur du garde-corps sera portée à 1m.

Pour les viaducs exceptionnels, on étudiera des types spéciaux[30].

A ces garde-corps ténus, on a fait ce reproche qu'à distance, un ouvrage ne paraît pas couronné du tout: tout compte fait, est-il si nécessaire qu'on voie quelque chose au-dessus de la corniche ? A de belles églises romanes, il n'y a rien, et c'est fort bien.

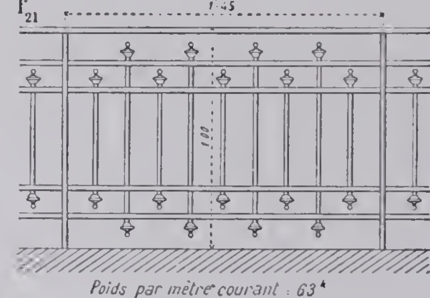
B. — En fonte.

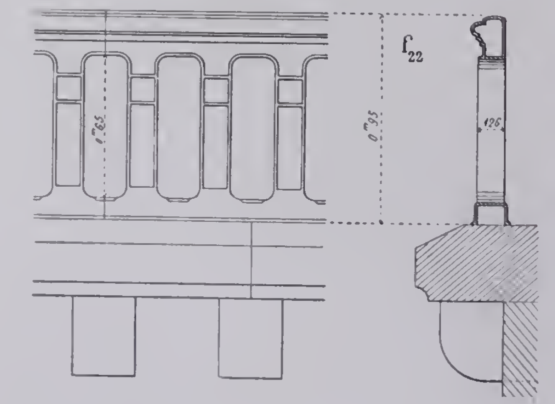
f_{20} — Viaduc du Sarget
Limoges à Brive par Pompadour



Sur des ouvrages très ornés, il pourra quelquefois convenir de placer des garde-corps en fonte, bien étoffés, — mais ils sont chers[31].

Les évidements f_{20}, un temps fort employés, sont ennuyeux.





29. — En mars 1913, on pouvait admettre :

Type	Prix du kilog.	Prix du m. c^t
f_{16}	0 fr. 50	6 fr. 50
f_{18}	0 fr. 56	21 fr. 28
f_{19}	0 fr. 52	32 fr. 76

30. — On a appliqué f_{21} au Pont de Saint-Loup, sur l'Allier (La Ferté-Hauterive à Gannat).

31. — Voici (f_{22}) celui du pont en construction à Abrest, près de Vichy (ligne de Riom à Vichy) : il pèse par m. c^t 180k.

§ 2. — *LARGEUR ENTRE TYMPANS. (garde-corps en métal)*

4m50 pour une voie; 8m08 pour deux voies, - largeur comptée au niveau de la plate-forme, c'est-à-dire à 0m50 en contrebas du plan supérieur des rails.

A titre exceptionnel, on pourra mettre en encorbellement le garde-corps sur des corbeaux, ancrés au besoin[32] sur une sous-plinthe[33], sur des consoles en béton armé[34]. Si le viaduc est haut, on fait ainsi une grosse économie.

§ 3. — *PLINTHE*

Art. 1. — Epaisseur h (f_{23}).

L'épaisseur de la plinthe varie avec l'importance, la hauteur, les ouvertures, le caractère de l'ouvrage.

Il faut une plinthe épaisse sur les viaducs très hauts, pour qu'on la voie, — et aussi sur les viaducs bas à grandes arches, parce que ce sont des ouvrages lourds.

Art. 2. — Saillie S (f_{23}).

Elle protège contre la pluie les têtes de l'ouvrage ; elle doit donc croître avec leur fruit. Quand elle est trop faible, la pluie les verdit, les noircit à partir de l'aplomb de la plinthe.

On augmentera la saillie, si l'on veut sous le couronnement une large ligne d'ombre.

Il faut au moins 0m20 ; mieux 0m25.

On creuse en dessous un larmier L pour empêcher les gouttes d'eau de ruisseler sur le tympan.

Art. 3. — Profil

On le trace suivant le caractère de l'ouvrage, la dureté, l'épaisseur de la pierre.

On ne doit refouiller que des pierres tendres.

Art. 4. — Plinthes courantes sous garde-corps en métal.

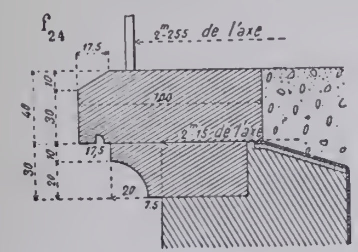
On adoptera le profil f_{23} et les dimensions que voici :

Hauteur maxima du viaduc H	Ouvertures des arches $2a$	Dimensions de la plinthe (f_{23})				
		Epaisseur h	Largeur l	Saillie S	Chanfrein	
					Largeur AN	Hauteur AM
Jusqu'à 20m	Jusqu'à 8m (inclus)	0m30	0m70	0m25	0m15	0m075
De 20 à 25m	De 8 à 10m (inclus)	0. 35	0. 75	0. 275	0. 17	0. 085
De 25m à 37m50	De 10 à 15m (inclus)	0. 40	0. 80	0. 30	0. 20	0. 10
De 37m50 à 50m	De 15 à 20m (inclus)	0. 45	0. 90	0. 35	0. 22	0. 11

NG sera toujours d'au moins 0m05, pour qu'on scelle les montants en deçà de l'arête.

Si le garde-corps avait plus de 0m045 d'épaisseur, on conserverait NG à 0,05 et on diminuerait AN.

32. — Au viaduc à voie normale de l'Oued Beja (Tunisie), la largeur entre tympans est réduite à 4m.



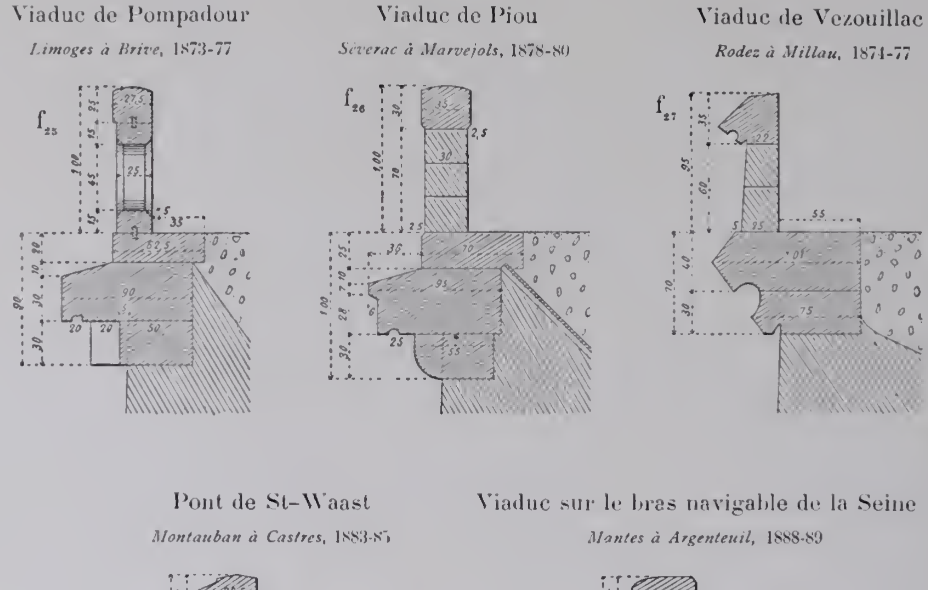
33. — Viaduc de Chanteloube (Chorges à Barcelonnette) — Projet, f_{24}, f_{34}, — Hauteur, 61m. Largeur entre têtes, 4m30.

34. — On a réduit la largeur entre tympans à 2m50 au Viaduc de Fontpédrouse, V, p. 87 (Ligne électrique à voie de 1m), — à 2m, aux ouvrages de la ligne à voie de 1m de la Vouga (Portugal).

On a donné 4m20 seulement aux ouvrages sous voie normale de Montrejeau à Bagnères-de-Luchon.

Grâce à des consoles en béton armé, la Cie d'Orléans a placé : 3 voies, dont une de 1m, (en tout 4m de voie), sur le viaduc de Saint-Florent de 8m30 entre têtes (Ligne d'Issoudun à St-Florent); — 3 voies, dont les deux de sa grande ligne, (soit 4m50 de voie), sur le pont sur l'Isle de la gare de Coutras, qui a 8m45 entre tympans.

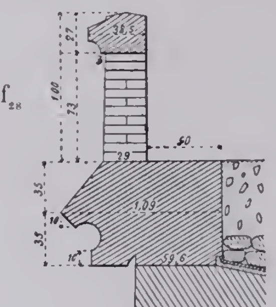
Art. 5. — Quelques profils un peu exceptionnels de corniches[35].



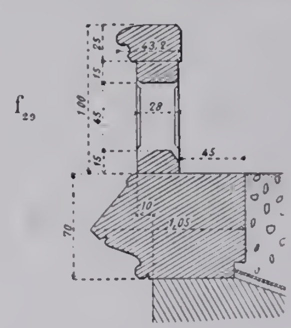
Viaduc de Pompadour
Limoges à Brive, 1873-77

Viaduc de Piou
Severac à Marvejols, 1878-80

Viaduc de Vezouillac
Rodez à Millau, 1874-77



Pont de St-Waast
Montauban à Castres, 1883-85



Viaduc sur le bras navigable de la Seine
Mantes à Argenteuil, 1888-89

A l'imitation des églises romanes d'Auvergne, on placerait heureusement des corniches sur corbeaux ; je dis des corbeaux, et non de menus modillons comme ceux de f_{25}.

f_{27} est emprunté à nos cathédrales du XIIIe siècle.[36, 37]

§ 4. — *NICHES DE REFUGE. — LEURS PARAPETS, LEURS SUPPORTS*

Dans un parapet plein, niches pleines ; — dans un parapet à jours, une niche pleine ne se comprend que pour couronner un contrefort, — et encore à condition que le parapet courant ait assez de pleins. Si non, de loin, on ne voit que les rectangles pleins des niches.

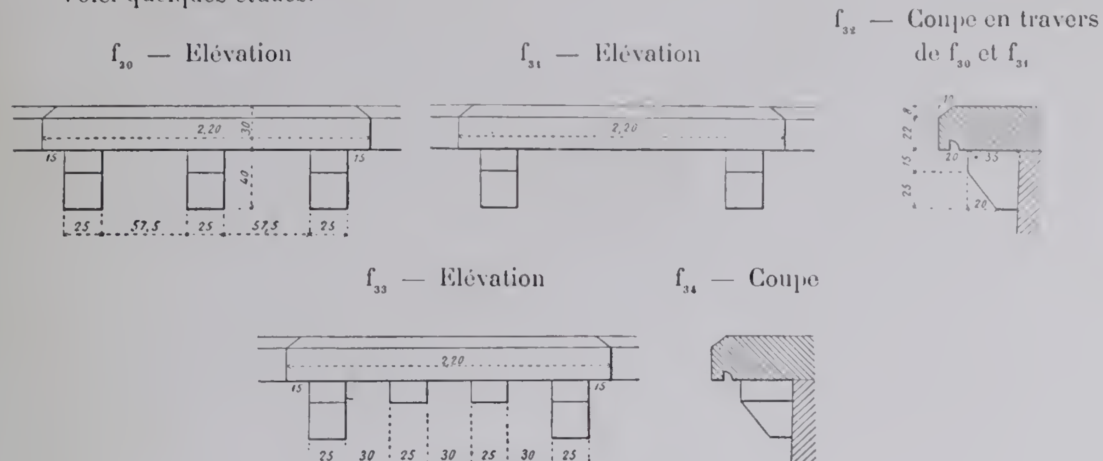
Sur nos viaducs, qui n'ont pas de contreforts, les niches doivent être discrètes, presque dissimulées, avoir le garde-corps courant, reposer sur deux ou trois corbeaux.

35. — Voir les couronnements des ponts du Castelet (II, p. 131, f_3), de Lavaur (II, p. 137, f_{13} à f_{16}), Antoinette (II, p. 145, f_8, f_{11}).

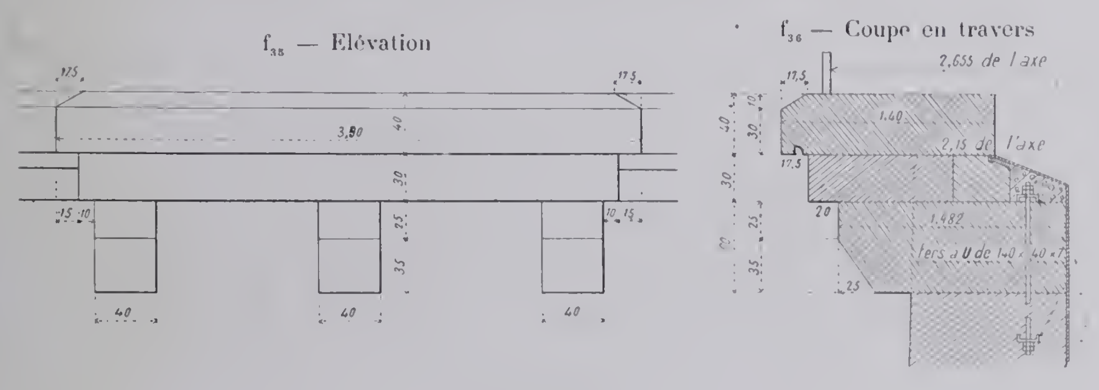
36. — M. Robaglia, alors Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, a ainsi couronné de grands viaducs de l'Aveyron et de la Lozère. C'est d'un bon effet, mais cher si la pierre est dure.

37. — On a posé ces plinthes gothiques sur de petits ouvrages, même sur des culées de ponts métalliques : c'est abuser.

Voici quelques études:



Refuge au-dessus d'une pile de 4^{m} d'épaisseur
Projet du Viaduc de Chanteloube *(Chorges à Barcelonnette)*



CHAPITRE V

VOÛTES[38]

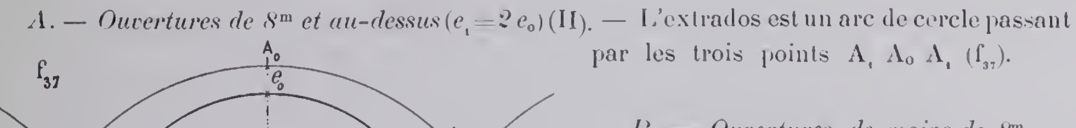
§ 1. — *CORPS*

Art. 1. — Epaisseur à la clef : $e_c = 0,19\,(1 + \sqrt{2a})$ (I)

A nombre de viaducs, on a, au lieu de 0,19 adopté 0,18 et même moins.[39] Pour tenir compte du poids et de la vitesse croissants des machines, il a paru prudent, — dans une Instruction sur les viaducs courants, — d'adopter 0,19.

Art. 2. — Epaisseur e_1 au milieu de la montée et tracé de l'extrados.

A. — Ouvertures de 8^{m} et au-dessus ($e_1 = 2\,e_0$) (II). — L'extrados est un arc de cercle passant par les trois points A_1 A_0 A_1 (f_{37}).



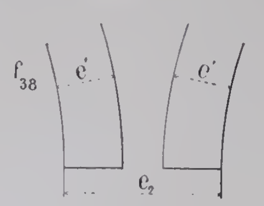
B. — Ouvertures de moins de 8^{m}. — La formule (II) donnerait aux reins des épaisseurs trop fortes : l'extrados sera un arc de cercle de rayon

$$R = 0,73\,(1 + 2a)\ [40]$$

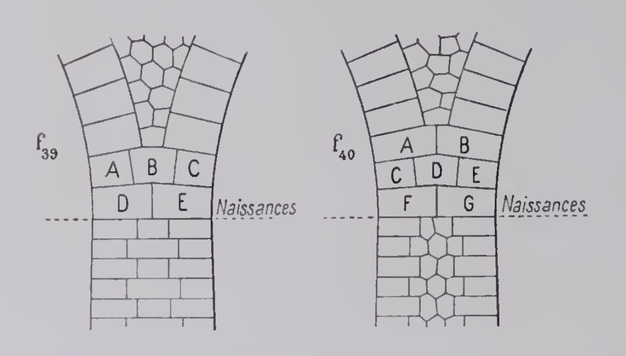
38. — Pour le mortier — chaux ou ciment — voir V p. 13. 39. — III, p. 386, 387, 388. 40. — Pour $2a \leqslant 8^{m}$, e_0, R, e_1, sont donnés p. 33.

§ 2. — *BANDEAUX*

Art. 1. — Epaisseur. Les bandeaux des viaducs à tympans pleins seront extradossés parallèlement, c'est-à-dire qu'ils auront une épaisseur constante e' très voisine de e_0.



En la réduisant, on fait une très petite économie, aux dépens de l'aspect : un bandeau mince est désagréable.



Il faut qu'aux naissances, entre les bandeaux de deux arches voisines, il y ait au moins 15cm, place d'un moellon :

$$e_2 \geqslant 2\,e' + 0^{m}15 \;(f_{38})$$

S'il n'en est pas ainsi, par exemple pour les petites portées ou pour des piles basses, on adoptera les dispositions des croquis f_{39} f_{40}.

Les pierres A, B, C, D, E, F, G, sont dans le plan du bandeau ; si le bandeau est en saillie, elles sont en saillie sur le tympan et sur la pile.

On indiquera plus loin[41] comment varie l'épaisseur aux naissances e_2 suivant la hauteur des piles : il en peut résulter quelque difficulté à appliquer la règle : $e_2 \geqslant 2e' + 0^{m}15$.

Si dans certains petits viaducs, il n'y a qu'aux plus hautes piles seulement un intervalle de 0m15 aux naissances entre les extrados des bandeaux, on fera au mieux pour l'aspect : par exemple, on adoptera f_{40} aux piles centrales ; on supprimera la saillie des bandeaux sur les tympans....

Art. 2. — Saillie. Le bandeau ne fera jamais saillie sur la douelle de la voûte.

Il sera en saillie de 3cm [42] sur la pile et sur le tympan: il y aura une petite ligne d'ombre sous ses naissances.

Sans doute, il est peu rationnel que, sur cette saillie, le bandeau ne soit pas soutenu; mais elle est fort utile pour le détacher des tympans, — pour qu'il ne s'y perde pas, surtout s'ils sont à bossages.

On pourra, toutefois, la supprimer pour les viaducs à arches de moins de 8m.

Il ne faut pas que le bandeau et la pile soient dans un même plan en saillie sur le tympan ; le tympan a l'air de rentrer dans la pile, cela engonce l'ouvrage.

Art. 3. — Appareil. Il sera en moellons d'appareil (MAV.), et non en pierre de taille.

Leur épaisseur h sera voisine de 0m20 (au moins 0m18, — rarement plus de 0m22, — très exceptionnellement 0m25).

41. — Chap. VI, § I.

42. — On a donné assez souvent 5cm c'est beaucoup; — le plus généralement 3cm aux plus petits viaducs et aux plus grands (Pompadour, Crueize....)

Afin d'éviter les carreaux, qui sont désagréables, on prendra au moins $1,5h$ pour la longueur l dans le sens du rayon et pour la queue q dans le sens des génératrices de la douelle. (f_{41})

l ne devra, d'ailleurs, pas dépasser $3h$, soit en pratique 0m60.

Dans le sens du rayon, il n'y aura qu'un seul moellon pour les bandeaux d'une épaisseur de 0m60 et moins ; au-delà, il y aura deux, trois moellons.

La découpe d de deux moellons voisins, sur la face du bandeau comme en douelle, sera au moins $\frac{h}{2}$, soit au moins 0m10, le plus souvent 0m15, quelquefois 0m20.

Pour ne pas multiplier les échantillons, les dimensions seront en nombre rond de 5cm.

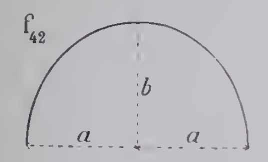
Voici l'appareil à adopter pour des moellons d'épaisseur voisine de 0m20 :

Ouverture des arches $2a$	Epaisseur de la voûte à la clef e_0	Epaisseur du bandeau e'	Moellons du bandeau		
			Nombre dans le sens du rayon	Longueur suivant le rayon l (f_{41})	Queue en douelle q (f_{41})
5m	0m61	0m50	1	0m50	0m30 — 0m40
6	0.66	0.55	1	0.55	0.30 — 0.40
7	0.69	0.60	1	0.60	0.35 — 0.50
8	0.73	0.70	2	0.40 — 0.30	0.35 — 0.50
9	0.76	0.75	2	0.45 — 0.30	0.30 — 0.45
10	0.79	0.75	2	0.45 — 0.30	0.30 — 0.45
11	0.82	0.80	2	0.45 — 0.35	0.35 — 0.45
12	0.85	0.85	2	0.50 — 0.35	0.35 — 0.50
13	0.88	0.85	2	0.50 — 0.35	0.35 — 0.50
14	0.90	0.90	2	0.50 — 0.40	0.40 — 0.50
15	0.93	0.90	2	0.50 — 0.40	0.40 — 0.50
16	0.95	0.95	2	0.55 — 0.40	0.40 — 0.55
17	0.97	0.95	2	0.55 — 0.40	0.40 — 0.55
18	1.00	1.00	2 ou 3	0.60 - 0.40 ou 0.30 - 0.30 - 0.40	0.40 — 0.60
19	1.02	1.00			0.40 — 0.55
20	1.04	1.05	2 ou 3	0.60 - 0.45 ou 0.30 - 0.30 - 0.45	0.45 — 0.60
21	1.06	1.05			0.45 — 0.60
22	1.08	1.10	3	0.30 — 0.30 — 0.50	0.45 — 0.60
23	1.10	1.10	3	0.30 — 0.30 — 0.50	0.45 — 0.60
24	1.12	1.15	3	0.35 — 0.35 — 0.45	0.45 — 0.60
25	1.14	1.15	3	0.35 — 0.35 — 0.45	0.45 — 0.60

§ 3. — *VOÛTES EN OVALE SURHAUSSÉ*

Un plein cintre vu de face, de bas, paraît surbaissé : pour l'élancer, on peut le surhausser légèrement,[43] tout en conservant sous les naissances, au sommet des piles, un petit élément vertical.[44]

On fera ainsi pour les très grands viaducs.



43. — Par exemple (f_{42}) : $2a$ = 20m b = 11m (au lieu de 10m).
$2a$ = 26m b = 14m (au lieu de 13m).
$2a$ = 27m b = 14m50 (au lieu de 13m50). Projet du viaduc de Chanteloube (Chorges à Barcelonnette) silhouette (f_{54}).

44. — Voir plus loin Chap. VI, § 2, art 1.

PILES

§ 1. — *ÉPAISSEURS DES PILES AUX NAISSANCES DES VOÛTES* e_2

Art. 1. — Piles à mortier de chaux.

A. — Portées de moins de 8ᵐ.

On a assez souvent pris $e_2 = 0{,}20\ (2a)$.

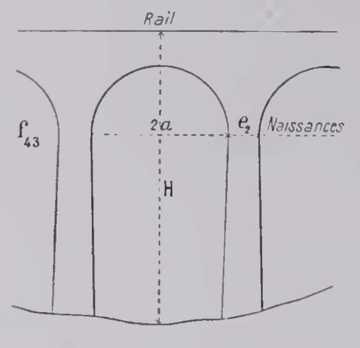
Pour les petites portées, c'est mince. Sur la largeur de la pile aux naissances, il n'y a que 3 ou 4 moellons. Sous les lourdes machines d'aujourd'hui, un défaut est plus dangereux qu'autrefois. Si donc on n'est pas assuré d'une exécution parfaite, on adoptera

$$\text{pour } 2a \leqslant 8^{m} \text{ au lieu de } 0{,}20\ (2a),$$

$$0{,}40 + 0{,}15\ (2a) \text{ et même } 0{,}80 + 0{,}10\ (2a).$$

B. — Portées de 8ᵐ et plus.

Pour le rapport $\frac{e_2}{2a}$, on a à peu près toujours pris 0,2[45] et pour toutes les piles d'un même viaduc, quelle qu'en fût la hauteur (f_{43}).



Au poids mort, ou sous les surcharges recouvrant tout l'ouvrage, la pression au sommet d'une pile ne dépend évidemment pas de sa hauteur, mais seulement de la portée $2a$: la hauteur n'intervient que dans le cas de surcharges dissymétriques, une arche chargée, l'autre non.

Pour les piles les plus hautes des viaducs dont l'ouverture des arches est, en général, voisine des 4/10 de la hauteur totale, les épures de stabilité justifient ce rapport $\frac{e_2}{2a} = 0{,}2$.

Mais ce qui n'est pas rationnel, c'est de le conserver pour toutes les piles.

Pour les pleins-cintres bas, comme le sont généralement les arches extrêmes des viaducs, il est excessif de prendre $\frac{e_2}{2a} = 0{,}2$ comme dans les ponts d'avant Perronet[46].

Des rapports $\frac{e_2}{2a}$ et $\frac{H}{2a}$ à quelques bons ouvrages en plein cintre, on peut déduire la formule empirique[47] (f_{44}).

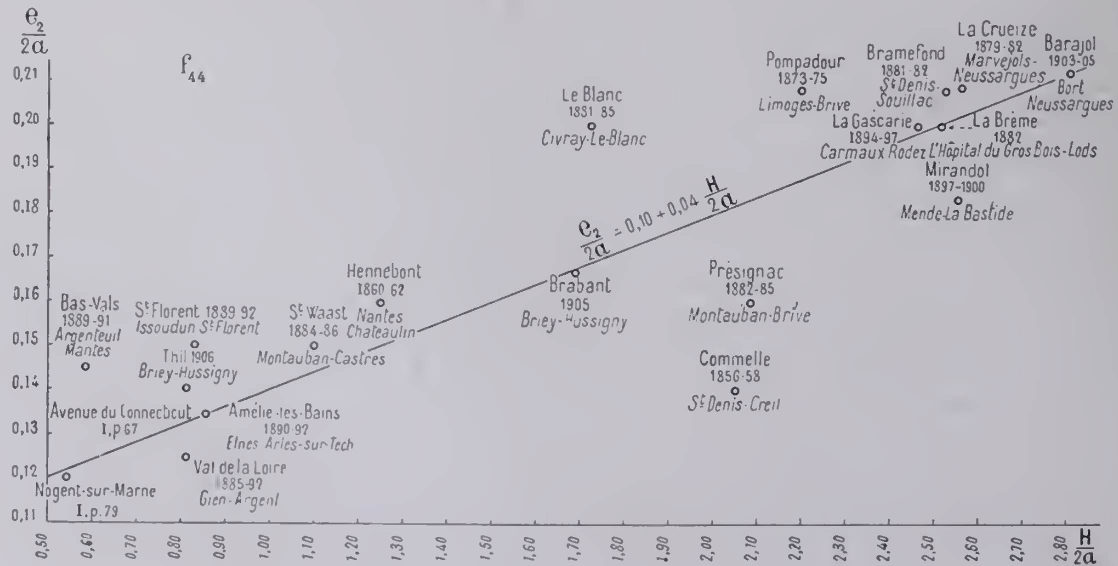
$$e_2 = \frac{2a}{10} + 0{,}04\ H$$

(H, hauteur entre le rail et le terrain à l'aval de la pile).

45. — On fait une grosse économie en réduisant $\frac{e_2}{2a}$: on est descendu à 0,16 au viaduc de Cize sur l'Ain, arches de 20ᵐ, mais il est à 2 étages (Ligne de Bourg à Bellegarde par la Cluse). J'ai adopté 0,183 au viaduc de Mirandol (Ligne de Mende à La Bastide). Dans nombre de viaducs italiens, on trouve $\frac{1}{6} = 0{,}167$.

46. — On adopte couramment $\frac{1}{8}$ pour les ponts en ellipse, $\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{10}$ pour les ponts en arc (V, p. 31).

47. — Ligne moyenne avec de grands écarts de part et d'autre.



On majore au besoin ce qu'elle donne, de façon qu'il n'y ait pas entre 2 piles voisines de différences d'épaisseur choquantes.

Si dans des piles ainsi définies, on calcule les efforts par les méthodes Culmann-Ritter[18], on trouve que, sous les surcharges dissymétriques, les piles basses travaillent plus que les hautes, plus flexibles : ces méthodes justifieraient plutôt

$$0{,}25a + 0{,}03\mathrm{H} \quad \text{et même} \quad 0{,}30a + 0{,}02\mathrm{H}.$$

Mais elles supposent que les piles aux naissances sont libres de se déplacer horizontalement, alors qu'elles en sont empêchées par les tympans.

Je ne sais pourquoi on n'a pas plus tôt fait varier e_2 avec H : l'aspect est meilleur, la dépense moindre[19].

La variation du rapport $\frac{e_2}{\mathrm{H}}$ n'est appréciable que sur le dessin ; elle ne l'est pas, et c'est ce qui importe, dans l'ouvrage : les piles les plus hautes paraîtront encore les plus minces.

De tout temps, on a fait varier l'épaisseur des supports avec leur hauteur : c'est ainsi que les Grecs réglaient, d'après le rayon des colonnes à leur pied (module), leur hauteur et leur espacement.

Quand la largeur des piles en élévation est inférieure à 1^m50, il reste, entre la queue des moellons d'angle, trop peu de place pour y loger pratiquement des moellons à joints incertains ; on y mettra alors des moellons équarris par assises réglées prolongeant celles des moellons d'angle.

Dans un petit viaduc, il peut arriver qu'aux naissances les piles centrales aient plus de 1^m50 de largeur, et les piles extrêmes moins de 1^m50 : s'il convient de faire en moellons incertains les parements des grandes piles, on élargira les petites à 1^m50.

Art. 2. — Piles à mortier de ciment.

On y admet un travail plus élevé, par conséquent une épaisseur moindre aux naissances et à toute hauteur[50, 51] : il n'y a pas encore assez d'exemples pour préciser[52, 53].

On la fixera d'après ce que peuvent porter les matériaux employés.

48. — Voir plus loin (2e Partie, Livre II).

49. — J'avais conseillé cette disposition en 1908, pour le viaduc de l'Oued Beja (Tunisie). Je l'ai adoptée aux viaducs de la ligne de Nice à Coni, en particulier à celui de l'Escarène (11 arches de 15^m, hauteur maxima 39^m) 1913-14 ; e_2 est de 3^m au milieu et descend à 2^m25, 2^m30 pour les piles de rive ; l'écart maximum d'une pile à sa voisine est de 0^m35.

50. — Au viaduc du Landwasser (hauteur 64^m, arches de 20^m, $R = 100^m$), elle est de 3^m50, soit 0,17 de la portée ; (pression sur le sol : 12^k5).

Albula-Bahn-Denkschrift im Auftrage der Rhätischen Bahn zusammengestellt von Prof. Dr Hennings. — Coire et Zurich, 1908, p. 26, Pl. 15 et 18.

51. — Au viaduc de Weissenbach (hauteur 62^m, arches de 25^m), elle est de 3^m50, soit 0,14 de la portée ; (pression sur le sol 11^k7).
Au viaduc sur la Sitter (arches d'accès de 25^m, au milieu, une travée métallique de 120^m), une des piles-culées de 7^m70 d'épaisseur aux naissances de la voûte d'accès, a une hauteur de 93^m ; elle résiste, sans contre-poussée, à une arche de 25^m. Sur le parement opposé, elle travaille à 25^k.)

Bodensee-Toggenburg-Zürichsee, *Denkschrift uber die Eisenbahn-Verbindung Romanshorn-St-Gallen-Wattwil-Uznach*, — St-Gall 1911 : Sitter, p. 82, Pl. 7 ; Weissenbach, p. 91, Pl. 8 et 9.

52. — Au viaduc de Malvan (hauteur 62^m, arches de 22^m), l'épaisseur aux naissances est seulement de 2^m50, soit 0,114 de la portée ; mais c'est sous tramway (Ligne de Cagnes à Vence, — Alpes-Maritimes).

53. — A des viaducs projetés (Lignes de Chorges à Barcelonnette, du Puy à Nieigles-Prades), $\frac{e_2}{2a} = 0{,}15$.

§ 2. — *FRUIT DES PILES*

Art. 1. — Ménager sous les naissances, en élévation, un élément vertical.

Pour adoucir le raccordement des piles aux voûtes, on disposera sous les naissances, en élévation, un élément vertical :

$$v = 0^m20 + \frac{2a}{100} \text{ avec la condition } v \geqslant 0^m40.$$

On arrondira v, de façon à comprendre un nombre entier d'assises

C'est au plan horizontal X_5X_5 (f_{45}) que commence le fruit en élévation.

Art. 2. — Comment on profile les piles.

On adopte[54] :

ou bien des fruits constants, avec un ressaut quand on atteint le travail limite ;

ou bien, pour les hauts viaducs, des fruits croissant avec la hauteur au-dessous des naissances ;

soit suivant des lignes brisées,

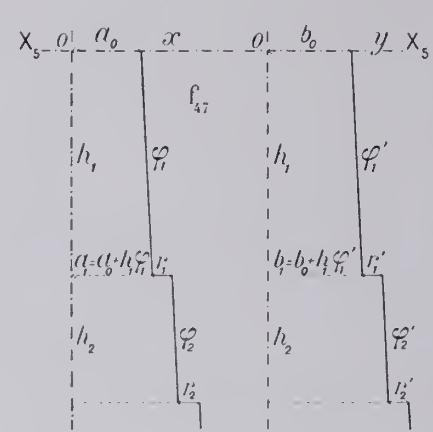
soit suivant des courbes continues.

Art. 3. — Fruits droits constants (f_{46}).

A. — *En élévation.* — On a admis au moins et le plus souvent 2^{cm}, au plus et moins souvent 3^{cm}, que l'œil accepte à peine. D'ailleurs, en forçant φ, on réduit trop le vide à la base.

B. — *En travers.* — Pour φ', on va de 2^{cm} à 5^{cm}.

C. — *Ressauts.* — Dans les hautes piles, on atteint la pression limite fort au-dessus du sol, par exemple à h_1 au-dessous des naissances (f_{47}).



On élargit alors la pile par un ressaut r_1 ; puis on repart avec le même fruit ou un plus grand, et on est obligé, si la pile est assez haute, à un deuxième ressaut r_2.

S'il n'y en a qu'un, et qu'il soit tout près du sol, il est comme le socle de la pile. C'est très acceptable. S'il est haut, il coupe fort désagréablement des lignes verticales qu'il faut respecter.

Deux ressauts sont choquants, comme on a le regret de le constater au beau viaduc de Pompadour (55^m de hauteur) : l'effet de hauteur en est fort amoindri.

54. — Les Romains dressaient verticalement les fûts des piles (Aqueduc de Ségovie). Reynaud a projeté ainsi le viaduc de Dinan, — exemple qui a été très peu suivi (*Traité d'Architecture. — Edifices*, p. 495, Pl. 71) : on en trouve de tels sur la ligne de Marseille à Avignon (avant 1847), par exemple :

le viaduc des Riaux près de l'Estaque (5 arches en plein cintre de 8^m, cordons aux naissances, bandeaux à crossettes) ;

le viaduc de la gare de Tarascon (61 arches dont 58 en plein cintre de 4^m d'ouverture, avec archivolte, cordons aux naissances). C'est un ouvrage romain : les Arènes de Nîmes, le pont du Gard sont tout près.

55. — Le volume de la tranche h_1 est :

$$V_1 = 4h_1 \left[a_0 b_0 + (b_0 \varphi_1 + a_0 \varphi'_1) \frac{h_1}{2} + \varphi_1 \varphi_1' \frac{h_1^2}{3} \right]$$

Il en eut fallu trois au viaduc de la Crueize (63^{m} de hauteur).

Pour les très hauts viaducs, il faut donc faire varier les fruits.

Art. 4. — Fruits croissants. — Profils en ligne brisée (f_{48}).

Au-dessous du plan $X_5 X_5$, origine des fruits en élévation, on divise la pile en tranches de même hauteur h et de fruits croissants :

$$\varphi_1 \; \varphi_2 \cdots\cdots \varphi_n \quad \text{en élévation ;}$$
$$\varphi'_1 \; \varphi'_2 \cdots\cdots \varphi'_n \quad \text{en travers.}$$

Soient a_n, b_n, les demi-côtés de la section de base de la $n^{ième}$ tranche :

$$a_n = a_0 + h \left[\varphi_1 + \varphi_2 + \cdots\cdots \varphi_n \right] \qquad b_n = b_0 + h \left[\varphi'_1 + \varphi'_2 + \cdots\cdots \varphi'_n \right]$$

Si chaque fruit croît, par rapport au précédent, de la même quantité εh, $\varepsilon' h$:

$$a_n = a_0 + nh \left[\varphi_1 + \frac{n-1}{2} \varepsilon h \right] \qquad b_n = b_0 + nh \left[\varphi'_1 + \frac{n-1}{2} \varepsilon' h \right]$$

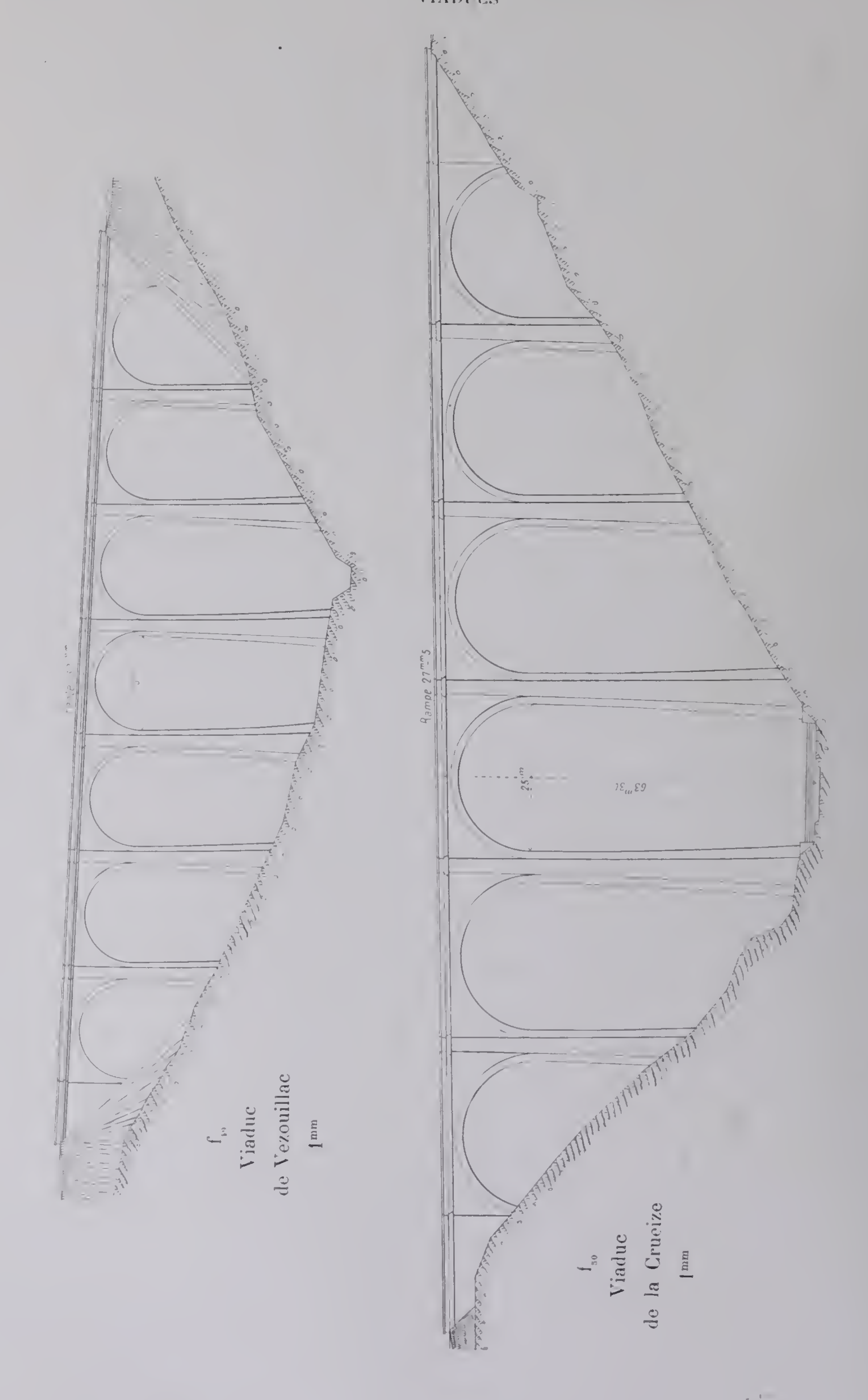
Posons $\qquad \varphi_1 = \varphi_0 + \frac{\varepsilon}{2} h \qquad \varphi'_1 = \varphi'_0 + \frac{\varepsilon'}{2} h$

Les courbes $A_0 A_1 A_2 \ldots$, $B_0 B_1 B_2 \ldots$ sont les paraboles :

$$x = a_0 + z \left(\varphi_0 + \frac{\varepsilon z}{2} \right) \qquad y = b_0 + z \left(\varphi'_0 + \frac{\varepsilon' z}{2} \right)^{56}$$

56. — Volume au-dessous de $X_5 X_5$ des n tranches de hauteur h $\quad (nh = H)$

$$W = 4H \left\{ \begin{array}{l} a_0 b_0 + (a_0 \varphi'_0 + b_0 \varphi_0) \frac{H}{2} + \left[\frac{a_0 \varepsilon' + b_0 \varepsilon}{2} \left(1 + \frac{1}{2n^2} \right) + \varphi_0 \varphi'_0 \right] \frac{H^2}{3} \\ + \frac{\varphi_0 \varepsilon' + \varphi'_0 \varepsilon}{2} \left(1 + \frac{1}{3n^2} \right) \frac{H^3}{4} + \frac{\varepsilon \varepsilon'}{4} \left(1 + \frac{5}{9n^2} + \frac{1}{9n^4} \right) \frac{H^4}{5} \end{array} \right\}$$



f_{15}
Viaduc
de Vezouillac
1mm

f_{30}
Viaduc
de la Crueize
1mm

On a pris, pour le fruit en élévation, avec $h = 4^m, 5^m$:

$$\varphi_1 = 15^{mm},\ 20^{mm}.$$

Pour élancer la pile, il convient de commencer par un petit fruit : φ croît souvent de 5^{mm} par tranche de 5^m, soit $\varepsilon = 1^{mm}$;

Φ_1. — Viaduc de la Crueize.[63]



Pour le fruit en travers :

$\varphi'_1 = 40^{mm}, 45^{mm}$
$\varepsilon' = 1^{mm}$.

Au pied de grands viaducs,

φ atteint 65^{mm}, 75^{mm}, 85^{mm}

φ' — 100^{mm}, 120^{mm}, 140^{mm}.

Si la stabilité l'exige, on augmente φ_1 et ε, φ'_1 et ε'.

A quelques viaducs, les fruits sont droits en élévation, courbes en travers[57].

Le premier viaduc à piles ainsi profilées est celui de Vezouillac[58, 59] (f_{49}), mais la pression n'y atteint que 6^k28 : ce viaduc, joli par en haut, a les pieds trop gros.

On a fait mieux à St-Laurent d'Olt[60], et encore mieux à la Crueize[61, 62], parce qu'on y a élevé le travail limite (9^k sans surcharge ni vent). C'est le plus beau viaduc de France (f_{50}, φ_1).

57. — Limoges à Brive par Uzerche.

58. — Le mérite en revient à M. Robaglia, alors Ingénieur en Chef à Rodez.

	Ligne de :	Date	Portée	Hauteur
59	Rodez à Millau	1873-77	16^m	43^m
60	Séverac à Marvejols	1877-79	20^m	53^m
61	Marvejols à Neussargues	1879-83	25^m	63^m

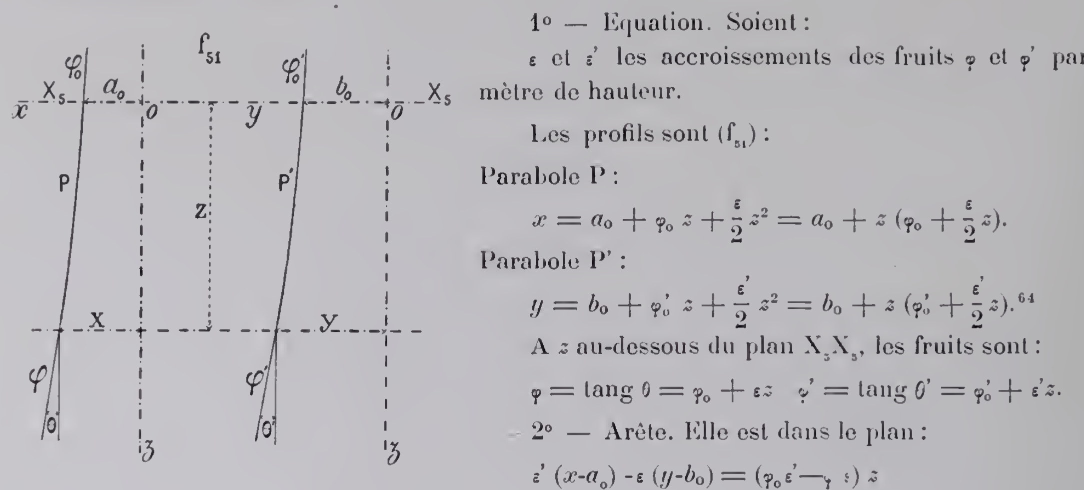
62. — A la Crueize, si la grande pile de 46^m50 eut eu les arêtes droites en conservant ses épaisseurs et ses largeurs aux naissances et en bas, les fruits eussent été : en élévation 0^m035, en travers 0^m102 : le cube de la pile eut été porté de 4392^{mc} à 4787^{mc}, c'est-à-dire augmenté de 395^{mc} (9 [illegible]).

63. — Cliché de M. Terpereau, photographe à Bordeaux.

Art. 5. — Fruits croissants. Profils en courbe (f_{51}).

A. — Paraboles du 2ᵉ degré.

On les préfèrera aux profils en ligne brisée.



1° — Équation. Soient :

ε et ε' les accroissements des fruits φ et φ' par mètre de hauteur.

Les profils sont (f_{51}) :

Parabole P :

$$x = a_0 + \varphi_0 z + \frac{\varepsilon}{2} z^2 = a_0 + z\left(\varphi_0 + \frac{\varepsilon}{2} z\right).$$

Parabole P' :

$$y = b_0 + \varphi'_0 z + \frac{\varepsilon'}{2} z^2 = b_0 + z\left(\varphi'_0 + \frac{\varepsilon'}{2} z\right).$$ [64]

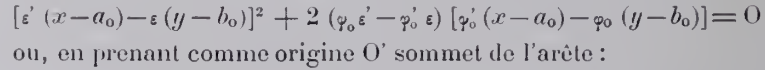
A z au-dessous du plan X_5X_5, les fruits sont :

$$\varphi = \text{tang}\,\theta = \varphi_0 + \varepsilon z \qquad \varphi' = \text{tang}\,\theta' = \varphi'_0 + \varepsilon' z.$$

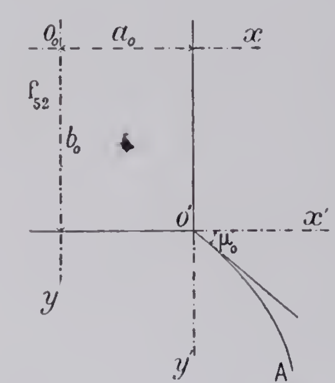
2° — Arête. Elle est dans le plan :

$$\varepsilon'(x - a_0) - \varepsilon(y - b_0) = (\varphi_0 \varepsilon' - \varphi'_0 \varepsilon) z$$

Sa projection horizontale O'A (f_{52}) est la parabole :



$$[\varepsilon'(x - a_0) - \varepsilon(y - b_0)]^2 + 2(\varphi_0 \varepsilon' - \varphi'_0 \varepsilon)[\varphi'_0 (x - a_0) - \varphi_0 (y - b_0)] = 0$$



ou, en prenant comme origine O' sommet de l'arête :

$$(\varepsilon' x' - \varepsilon y')^2 + 2(\varphi_0 \varepsilon' - \varphi'_0 \varepsilon)(\varphi'_0 x' - \varphi_0 y') = 0$$

L'axe est parallèle à la droite :

$$y = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} x$$

$$\text{Tang}\,\mu_0 \text{ en } O' = \frac{\varphi'_0}{\varphi_0}$$

On a vu que l'arête est dans un plan : ce plan est vertical, par conséquent la projection horizontale est une droite si $\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{\varphi'_0}{\varphi_0}$.

Voici les silhouettes de 2 viaducs à fruits courbes (f_{53}, f_{54}) ; l'épaisseur des piles aux naissances y varie avec la hauteur (p. 56) ; à Chanteloube (f_{54}), les voûtes sont en ovale surhaussé (p. 55)

B. — Paraboles du 3ᵉ degré.

Si la section n'augmentait pas assez vite avec z, on ajouterait un terme en z^3.

Parabole P (f_{51}) : $x = a_0 + \varphi_0 z + \frac{\varepsilon}{2} z^2 + \frac{\zeta}{6} z^3$

Parabole P' (f_{52}) : $y = b_0 + \varphi'_0 z + \frac{\varepsilon'}{2} z^2 + \frac{\zeta'}{6} z^3$.

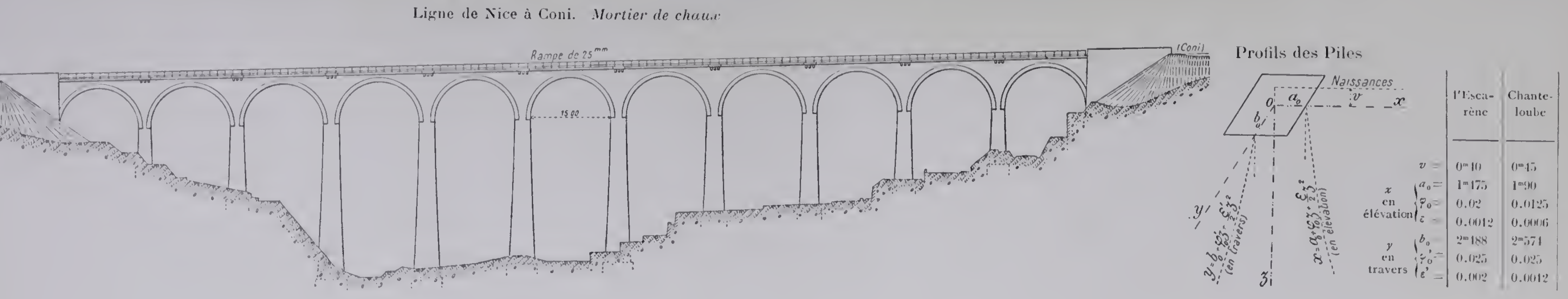
$\text{Tang.}\,\theta = \varphi_0 + \varepsilon z + \frac{\zeta}{2} z^2 \qquad \text{Tang}\,\theta' = \varphi'_0 + \varepsilon' z + \frac{\zeta'}{2} z^2$.

64. — Volume au-dessous de X_5X_5 sur une hauteur H :

$$V = 4H\left[a_0 b_0 + (a_0 \varphi'_0 + b_0 \varphi_0)\frac{H}{2} + \left(\frac{a_0 \varepsilon' + b_0 \varepsilon}{2} + \varphi_0 \varphi'_0\right)\frac{H^2}{3} + \left(\frac{\varphi_0 \varepsilon' + \varphi'_0 \varepsilon}{2}\right)\frac{H^3}{4} + \frac{\varepsilon\varepsilon'}{4} \times \frac{H^4}{5}\right].$$

f_{53} — Viaduc de l'Escarène — 1^mm (1913-15)

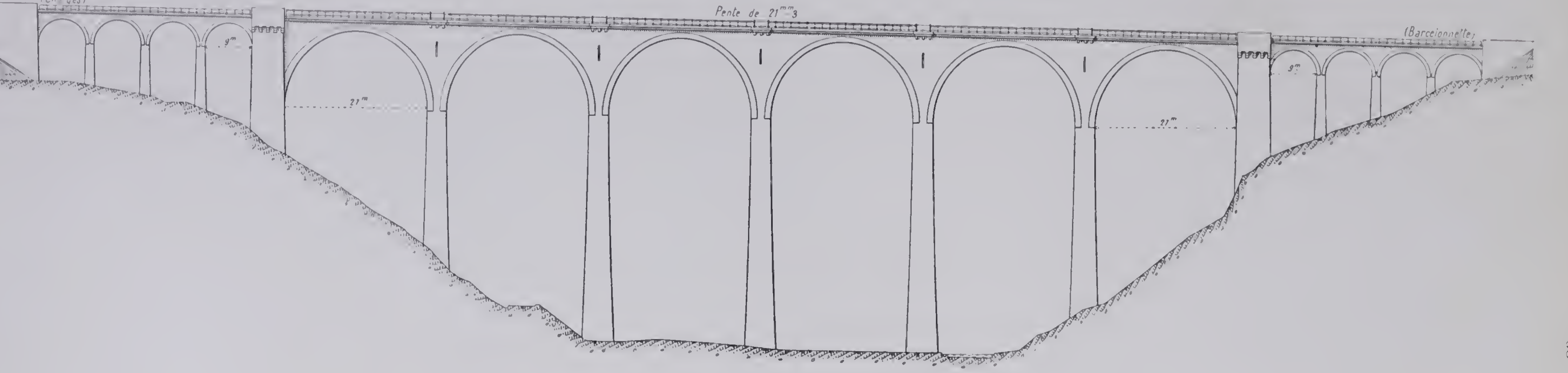
Ligne de Nice à Coni. *Mortier de chaux*



		l'Escarène	Chanteloube
	$v =$	0m10	0m45
x en élévation	$a_0 =$	1m175	1m90
	$\varphi_0 =$	0.02	0.0125
	$\varepsilon =$	0.0012	0.0006
y en travers	$b_0 =$	2m188	2m571
	$\varphi'_0 =$	0.025	0.025
	$\varepsilon' =$	0.002	0.0012

f_{54} — Viaduc de Chanteloube — 1^mm (Projet)

Ligne de Chorges à Barcelonnette. *Mortier de Ciment*



Art. 6. — Hauteur à partir de laquelle on adoptera les fruits courbes.

Des fruits variables donnent quelques sujétions : si faibles qu'elles soient, elles absorbent une petite partie de l'économie sur le cube.

On peut, arbitrairement, fixer à 35m la hauteur (à 14m la portée) jusqu'à laquelle on conservera les fruits constants.

§ 3. — *PILES-CULÉES ENTRE ARCHES ÉGALES N'EN PLUS FAIRE*

Si une arche tombe, toutes tombent les unes après les autres. Pour limiter les chutes, à d'anciens viaducs[65, 66], quelquefois à de récents[67], on a épaissi, au grand dommage de l'aspect, une pile sur 3, sur 4.

Mais il est à craindre que, calculées pour être stables, ces « piles-culées » ne soient pas assez rigides et que, sans tomber elles-mêmes, elles laissent tomber les arches[68, 69].

On a construit sans piles-culées nombre de grands viaducs : les très rares que l'on fait encore semblent des organes-témoins reproduits par tradition.

§ 4. — *CONTREFORTS*

Dans les hauts viaducs, on a souvent plaqué sur les piles des contreforts (f_{33}, f_{36}), plus pour les décorer que pour les renforcer.

65. — Viaducs à deux voies et deux étages :
Du Gouet, 59m45 de hauteur, deux piles-culées (Rennes à Brest) ; — de Morlaix, 62m16 de hauteur trois piles-culées (Rennes à Brest) 1861-63 ; — de Velars, de la Combe-Bouchard. de la Combe-de-Fin, une pile-culée par 5 arches (tous les trois sur la ligne de Paris à Dijon, descente de Blaizy à Dijon) 1847-49.

66. — Cette précaution est fort ancienne : il y a 2 piles-culées au pont de Blois (1716-1724).

67. — Viaducs : du Blanc (Poitiers au Blanc) 1881-85, 21 arches de 20m, 4 piles-culées ; — de l'Auzon (Argenton à La Chatre) 1897-1900, 42m70 de hauteur, 20 arches de 20m, 2 piles-culées ; — sur l'Oued Beja (Mateur à Nebeur, Tunisie) 1908-10, 54m de hauteur, 12 arches de 21m, piles courantes de 4m20 aux naissances, piles-culées de 6m20, une pile-culée par 4 arches.

Aux viaducs de la ligne du Lœtschberg 1910-12, on a « renforcé » chaque 6e pile pour des voûtes de 10m, chaque 5e pour 12m, 14m, chaque 4e pour 16m, 18m 20m.

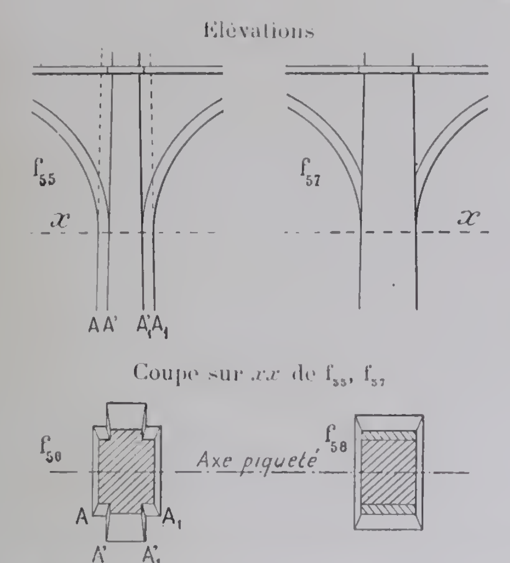
68. — Chute du pont de Vernon (111, p. 378).

ϕ_2. — Viaduc de Poix



69. — Le 31 août 1914, le Génie Français a fait sauter des arches côté Amiens du viaduc de Poix (ligne d'Amiens à Rouen), ouvrage en briques, hauteur maxima 30m, 12 arches de 16m50 en 4 groupes de 3, limités par des piles-culées. Les arches côté Amiens sont tombées jusqu'à une pile-culée (ϕ_2) qui s'est inclinée vers Amiens de 48cm au niveau du rail ; l'arche au delà (côté Rouen) s'est fendue : on n'en a conservé que les retombées.

Il est permis de penser que cette pile-culée a sauvé les 6 arches côté Amiens. A certains hauts viaducs à couper en temps de guerre, peut-être convient-il de ménager des piles-culées, mais assez épaisses pour ne pas fléchir si une des arches qui les encadrent est ruinée.



Les 4 arêtes A, A_1, A', A'_1, doivent, pour l'aspect, concourir en un même point au-dessus de l'ouvrage (f_{55}).

Les fruits des contreforts sont moindres en élévation que ceux des arêtes de la pile, par exemple de 1^{cm}, plus grands en coupe transversale, par exemple de 2^{cm}.

Le contrefort laisse apparaître les bandeaux des deux arches qui l'encadrent : pour qu'il ne soit pas trop maigre, il faut des arches d'au moins 16^{m}.

On lui a, quelquefois, donné la largeur même de la pile (f_{57}). On supprime ainsi deux arêtes ; mais il y a un peu plus de cube. Quoique les bandeaux soient assez fâcheusement coupés, ce n'est pas laid.

Φ_3. — Viaduc de Piou[70, 71].



Souvent, aux viaducs divisés par des piles-culées, on n'a fait de contreforts qu'à ces piles-là.

Il y a de fort beaux viaducs avec contreforts (Φ_3) : on en peut faire de tout aussi beaux sans contreforts.

Au-dessus des naissances, ils ne servent qu'à supporter les niches de refuge ; ils compliquent l'appareil des tympans.

70. — Ligne de Séverac à Marvejols (1877-79). Il est de la famille des viaducs de Morandière (Aulne, Pompadour,...)

71. — Contre les tailloirs des contreforts, voir V p. 99.

Au-dessous, ils renforcent la pile ; mais on peut trouver à meilleur marché la surface nécessaire en faisant croître les fruits.

Il vaut mieux n'en plus faire.

Ceci ne s'applique qu'aux viaducs à arches égales. Un contrefort, un pilastre peuvent utilement encadrer une grande arche, séparer un corps central à grandes arches d'un viaduc d'accès à petites.

§ 5. — *MASSIF DE FONDATION*

Art. 1. — En règle générale, dresser le sol horizontalement sans gradins[72]

A. — On est sur rocher.

Supposons qu'on ait taillé le rocher en gradins, avec marches horizontales AB, CD, EF (f_{59}).

La tranche de maçonnerie B B' C C' tasse : les pointes de rocher qui, elles, ne tassent pas, tendent à y entrer comme des coins et à la fendre ; le danger augmente :

1° — avec la charge. — Donc pas de gradins sous les piles des hauts viaducs. On dressera horizontalement le fond de la fouille, même au prix d'un grand déblai de rocher.[73]

2° — avec la hauteur des gradins. — Donc, si on accepte les gradins, qu'ils soient petits.

3° — avec la nature de la maçonnerie sur les gradins. — Employer des moellons à assises horizontales au lieu de moellons bruts, du mortier de ciment au lieu de mortier de chaux, et laisser durcir le mortier avant de continuer.

B. — On n'est pas sur rocher.

Supposons maintenant que l'on ait affaire à un terrain moins résistant que la maçonnerie (calcaire tendre, marne, tuf, etc...)

Si on y taille des gradins, ce seront eux qui tasseront plus que la maçonnerie : leurs pointes céderont et ne la soutiendront plus.

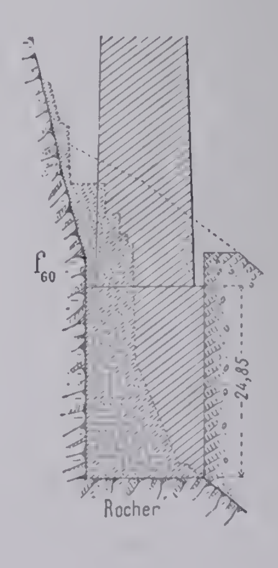
Donc, pour tous terrains, une haute pile sera bâtie sur plate-forme horizontale sans gradins.

Art. 2. — Ne pas s'arrêter à la surface du rocher. S'encastrer dans le vif.

Souvent, le dessus du rocher n'est pas bon. Il faut atteindre le vif[74].

Art. 3. — Bien nettoyer le sol de fondation.

Au moment où l'on commence à maçonner, la fouille doit être bien purgée, bien propre.



72. — Pour les gradins sous les ouvrages de 8m et au-dessous, voir p. 30.

73. — Au viaduc des Crottes (Morbier à Morez), on a rencontré le rocher disposé comme l'indique f_{60}.
On a tout déblayé jusqu'à une plate-forme horizontale tout entière dans le rocher.

74. — Au viaduc de Mussy (Paray-le-Monial à Givors), 63m de hauteur, on est descendu à 8m dans le rocher tendre.
Au pont sur la Seine, près de Montereau (Corbeil à Montereau), on a rencontré sous le gravier une craie tendre à 4m17 sous l'étiage. Il fallut descendre à 15m45 pour trouver une bonne craie résistante.

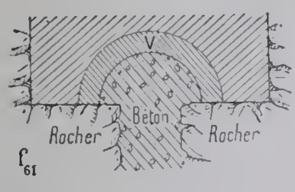
S'il restait à sa surface une couche molle, la maçonnerie la chasserait par son poids et tasserait de l'épaisseur de cette couche.

Si le fond est du rocher, il faut le piquer à la grosse pointe, bien enlever les recoupes et la poussière, puis bien laver à grande eau et poser la première assise sur une couche de mortier.

Certains terrains, le sable argileux par exemple, se ramollissent par l'eau et sous les pieds des ouvriers. Il faut bien nettoyer et décaper la fouille à vif et couler rapidement une couche générale de béton de ciment qu'on laisse prendre et sur laquelle on maçonne.

Sur quelque terrain que l'on fonde, il est bien entendu que l'Ingénieur ne laissera pas commencer les maçonneries avant d'avoir, *lui-même*, vérifié et accepté la plate-forme ; il surveillera, *lui-même*, la pose des premières assises.

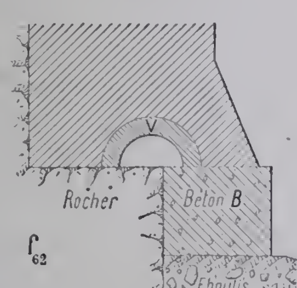
Si la plate-forme est ramollie par l'eau, on l'assèchera, si on le peut, par des galeries[75].



Art. 4. — Il y a des fissures dans le rocher de fondation.

On les nettoie à vif et on les bourre de béton de ciment[76].

Si une fissure profonde traverse la fondation, on la vide sur 2 ou 3^{m}, on la bourre de béton de ciment, dessus on construit une voûte V (f_{61})[77].



Art. 5. — On trouve, en fondation, deux natures de sol.

On fait alors au mieux, suivant les circonstances, pour diminuer la pression sur la partie la plus faible et la répartir le plus également possible sur toute la fondation.

Si, par exemple (f_{62}), on trouve d'un côté du rocher, de l'autre des éboulis, on élargira la fouille du côté des éboulis ; on coulera dessus un massif de béton de ciment B : par dessus la surface séparant le rocher des éboulis, pour égaliser les pressions, on jettera une voûte V, une dalle en béton armé...

Art. 6. — Ressaut.

Au-dessous du sol naturel, il faut ménager un ressaut :

1°. — *pour élargir la base d'appui, en vue de réduire la pression* sur le sol ou sur les maçonneries. On le détermine d'après la pression limite admise.

2°. — *pour parer aux erreurs d'implantation.* On lui donne, en général, 0^{m}20, 0^{m}25, 0^{m}30, — jusqu'à 0^{m}40.

Quand la maçonnerie repose sur du béton, il faut augmenter le ressaut pour qu'il n'y ait pas de pression près de l'arête du béton. On a été jusqu'à 0^{m}90, 1^{m}.

3°. — *pour parer aux déplacements des massifs descendus, soit par havage, soit à l'air comprimé.* On le fera d'autant plus grand que les massifs auront plus à descendre[78] ; s'ils doivent traverser une épaisseur H de terrain, on donnera au ressaut : $0^{m}20 + 0{,}02\,H$.

75. — Travaux d'assainissement et de consolidation de la ligne de Lons-le-Saulnier à Champagnole, — viaducs de l'Ermitage et de Vertaneul.
Annales des Ponts et Chaussées, 1893, 2e semestre, p. 573, — MM. Moron et Canat.

76. — Viaduc de Puyredon (Nontron à Sarlat), 1893-94.

77. — Viaducs du Boulet (Cahors à Brive), de Bramefond (Saint-Denis au Buisson).

78. — On a constaté des déplacements :
de 0^{m}65 à une pile du viaduc du Val Saint-Léger (Ligne de la Grande-Ceinture) descendue à 30^{m} ;
Annales des Ponts et Chaussées, novembre 1882. « *Notice sur la Traversée du Val St-Léger* », M. Geoffroy.
de 0^{m}20 à une pile du pont de Marmande, (Ligne de Marmande à Casteljaloux, 1880) descendue à 6^{m} dans du gravier, puis du tuf.

TYMPANS

§ 1. — *FRUIT DU PAREMENT VU*

Art. 1. — Il faut donner du fruit aux tympans.

Les tympans sont au-dessus de piles en fruit.

A nombre de viaducs, ils n'ont pas de fruit (f_{63}), mais l'œil y redresse la pile CB et voit le tympan BA en surplomb : c'est choquant.

Quand on s'est inquiété de l'aspect, — et il s'en faut toujours inquiéter, — on a donné du fruit aux tympans : à beaucoup 20^{mm}, assez souvent 30^{mm} [79].

C'est aussi un peu plus stable.

Art. 2. — Fruits à adopter.

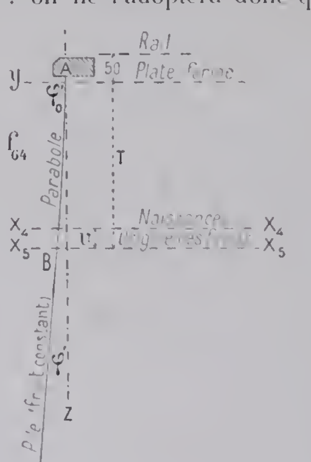
1er *Cas. Pile à fruit constant.*

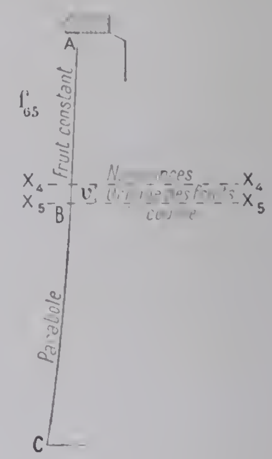
A. — *Tympan ayant même fruit que la pile.* — Cette disposition augmente un peu le cube des maçonneries : on ne l'adoptera donc que pour les petits viaducs. J'admets, un peu arbitrairement, 20^m comme limite de hauteur[80].

Pour la pile, comme pour les tympans, le fruit transversal φ' sera 30^{mm}, 40^{mm}, au plus 50^{mm}.

B. — *Tympan parabolique* (f_{64}). — Le tympan est dressé suivant une parabole ABC à axe horizontal, tangente en B à la pile de fruit φ' et ayant sous la plinthe un fruit très faible φ'_0, par exemple, 2^{mm} ; elle a pour équation :

$$y = z\left(\varphi'_0 + \frac{\varphi' - \varphi'_0}{2\,T}\,z\right).$$





2e *Cas. Pile à fruit courbe* (f_{65}).

La coupe du tympan AB est une droite tangente en B à la parabole de la pile.

79. — et même 50^{mm}. C'est trop pour des viaducs en alignement. On a été jusqu'à 70^{mm}, mais pour les tympans convexes de viaducs en courbe.

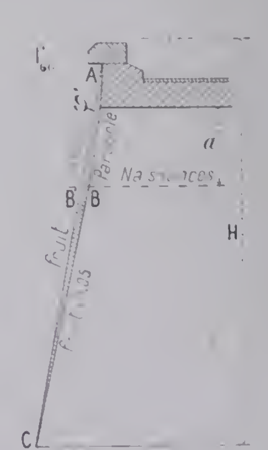
80. — Soient, pour un viaduc de hauteur H et d'ouverture $2a$ (f_{66}) :

V_2 le volume des maçonneries entre les plans verticaux des clefs de deux voûtes voisines ; les piles ont un fruit constant de 25^{mm} en élévation, de 50^{mm} en coupe transversale ; les tympans sont dressés suivant une parabole ABC tangente aux piles à leurs naissances B et dont l'axe passe par le dessous de la plinthe.

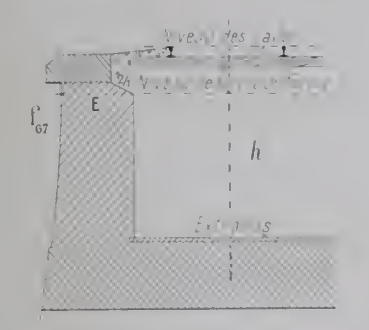
V_1 le volume défini de même, mais avec tympan et pile dressés en coupe transversale suivant un fruit unique AB'C.

On trouve :

Hauteur H	Ouverture $2a = 0,4$ H	$V_1 - V_2$	Hauteur H	Ouverture $2a = 0,4$ H	$V_1 - V_2$
12m50	5m	1mc57	30m	12m	18mc
17m50	7m	3mc95	37m50	15m	34mc
25m	10m	10mc73	50m	20m	78mc



§ 2. — *TYMPANS PLEINS*

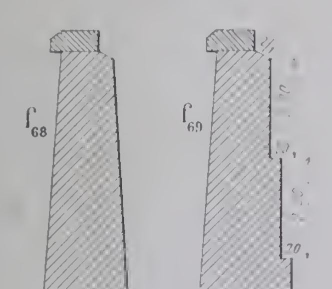


Art. 1 — Epaisseur.

Pour les tympans pleins, ou évidés par des voûtes longitudinales de 1^m30 au plus de portée, E ne descend pas au-dessous de 0^m80, ne dépasse guère 1^m20, est d'ordinaire 1^m.[81]

Le plus souvent, le parement intérieur est vertical.

On a quelquefois donné un fruit intérieur (f_{68}) ; ce n'est pas bon : au passage des trains, le remplissage peut faire coin et tendre à les ouvrir. Il est préférable de ménager des redans de 0^m20 tous les 2^m (f_{69}).



Art. 2. — Remplissage entre les tympans.

Il doit :

1°. — être et rester incompressible, sec ou mouillé, pour ne pas s'enfoncer sous les trains ;

2°. — être insensible à l'action de l'eau, c'est-à-dire n'être ni gonflé, ni imprégné, ni décomposé, ni entraîné par elle : donc pas de remblais terreux, argileux, crayeux, gypseux ;

3°. — tenir, sec ou mouillé, à un talus aussi raide que possible, pour ne pas pousser sur les tympans : donc pas de remblais argileux, sablonneux, qui poussent quand ils sont mouillés ;

4°. — au-dessus de la chape, être très perméable, pour que l'eau y arrive tout de suite et ne séjourne pas dans l'ouvrage.

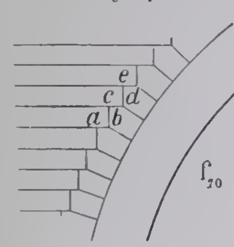
5°. — être léger, pour réduire la poussée dans les voûtes et la charge sur le sol.

Toutes ces conditions sont satisfaites par un remplissage en graviers bien lavés ; mieux, par des déblais rocheux rangés à la main.

Entre les voûtes et la chape (si elle n'est pas appliquée sur les voûtes elles-mêmes), on peut employer du béton maigre contenant seulement 100^k de chaux par m.c. de sable. Mais il faut le faire par temps sec et l'abriter aussitôt fait : s'il pleut dessus, il s'y emmagasine de l'eau qui ne peut plus sortir ensuite qu'à travers les voûtes ou les tympans.

Art. 3. — Raccordement de l'appareil des tympans avec celui des bandeaux.

Si le tympan est à joints incertains (MOI), aucune difficulté.

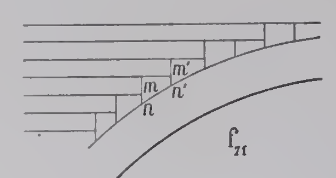


Mais, si les moellons de parement sont par assises horizontales (MOH, ME), ils rencontrent l'extrados du bandeau suivant des becs de flûte de plus en plus aigus à mesure que l'on se rapproche de la clef.

Le plus rationnel serait d'appareiller en crossettes les moellons de raccordement (f_{70}). On l'a fait quelquefois, mais au détriment de l'aspect : les pointes *a, c, e... b, d...* dessinent des courbes d'extrados qui nuisent à celle du bandeau.

Il vaut mieux conserver les assises horizontales et couper simplement les angles

81. — Voir plus loin renvoi 90.



trop aigus (f_{71}) : on commence, pour les pleins cintres à bandeaux extradossés parallèlement, à 45° de la verticale. Les pointes *mn*, *m'n'*... des moellons auront au moins 0m10.

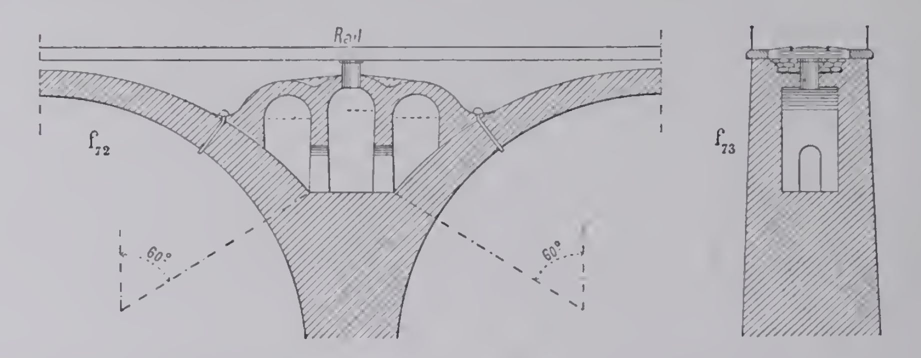
§ 3. — *TYMPANS ÉLÉGIS*[82]

Art. 1. — Portée à partir de laquelle on élégit.

On n'évidera pas au-dessus de pleins cintres de moins de 15m ; on évidera toujours à plus de 19m.

Art. 2. — Elégissements transversaux.[83]

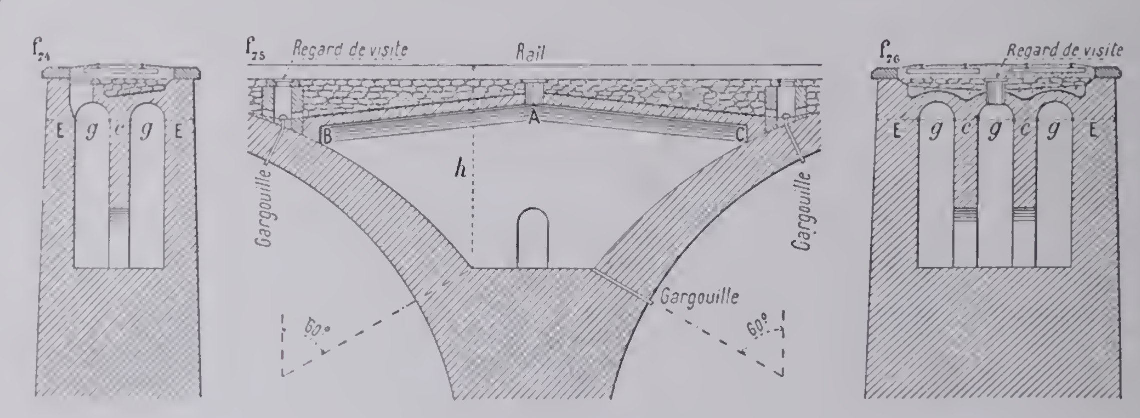
On se gardera de les montrer. On ne jettera pas d'arc unique entre deux grandes voûtes[84]. On élégira par de petits pleins cintres cachés (f_{72}, f_{73})[85].



Ils relient les tympans que tendent à écarter les voûtes longitudinales : ceux-ci ne sont plus qu'un masque, on en réduit l'épaisseur à 0m70, 0m80.

Art. 3. — Elégissements longitudinaux.[86]

Les voûtes d'évidement ont 1m20, 1m30 sur cloisons de 0m60 : il y en a deux aux viaducs



82. — Voir V, p. 50 et suivantes. 83. — V, p. 51, 57, 58. 84. — Viaducs de la ligne de Millau à Séverac (1873-77), 85. — V, p. 59, § 6. 86. — V. p. 59.

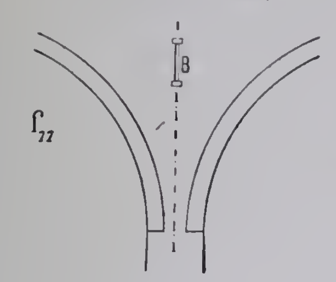
à 1 voie (f_{74}, f_{75})[87, 88], trois à ceux à 2 voies (f_{76}, f_{75})[89, 90].

A partir du milieu A (f_{75}), elles auront des pentes d'au moins 5cm.[91]

Elles sont presque toujours en plein cintre : elles seraient mieux en ogive, en ellipse surhaussée, pour moins pousser les tympans[86].

Elles répartissent mal les charges sur les grandes voûtes[92].

Dans les courbes, à leur poussée s'ajoute la force centrifuge.



On y descendra par des regards débouchant, pour les viaducs à 1 voie, soit dans les trottoirs contre les plinthes, soit dans l'axe de la voie ; pour les viaducs à 2 voies, dans l'entrevoie.

Art. 4. — Il faut visiter les élégissements cachés.

Les maçonneries se conservent mal dans l'air humide.

Dans nos derniers grands viaducs, nous avons traversé le tympan par une barbacane B (f_{77}).

Art. 5. — Il faut les aérer.

CHAPITRE VIII

CULÉES[93]

Les culées sont les parties les plus variables des ouvrages ; elles dépendent encore plus que les autres de la forme et de la nature du terrain.

On ne peut donc donner ici que des indications tout à fait générales.

87. — Il n'y en a qu'une aux viaducs des lignes de Tournemire au Vigan (1886-95), d'Espalion à Bertholène (1903-07) ; elle a alors 1m60, 1m80. Il faut pour la tenir des tympans épais.

88. — Il y en a 3 de 0m80 au viaduc de Légaud (Eymoutiers-Meymac), 3 de 0m70 à celui de la Donne (Saint-André à Puget-Théniers 1905-07).

89. — Il n'y en a que deux aux viaducs de l'Aulne (Nantes-Landerneau), de Mussy (La Clayette-Lamure 1892-95). Elles ont 2m, 2m30. C'est trop.

90. — Voici quelques exemples :

	Viaduc de	Ligne de	Dates de construction	Ouverture des grandes arches 2a	Voûtes d'élégissement en plein cintre: Ouverture g	Voûtes d'élégissement en plein cintre: Epaisseur des cloisons c	Voûtes d'élégissement en plein cintre: Hauteur du rail au-dessus du creux h	Epaisseur des tympans E: hors du contrefort	Epaisseur des tympans E: y compris le contrefort
1 Voie 2 voûtes d'élégissemt f_{74} — f_{75}	Vignols	Limoges à Brive	1872-75	20m	1m30	0m60	6m10	0m70	1m15
	Pompadour			25	1.30	0.60	8.21	0.96	1.35
	La Sagne			20	1.30	0.60	6.10	0.70	1 15
	Le Sarget			20	1.30	0.60	6.10	0.70	1.15
	Le Blanc	Poitiers au Blanc	1881-85	20	1.05	0.75	6.90	1.03	
	Barajol	Bort à Neussargues	1903	20	1.00	0.60	3.59	1.10	1.48
	Saint-Waast	Montauban à Castres	1882-84	20	1.20	0.59	6.00	0.96	Pas de contrefort
	L'Auzon	Argenton à La Châtre	1897-1901	20	1.20	0.60	7.19	0.89	
2 Voies 3 voûtes d'élégissemt f_{75} — f_{76}	Piou	Séverac à Marvejols	1878	20	1.20	0.80	6.45	1.60	2.21
	Senouard	Marvejols à Neussargues	1879-83	18	1.20	0.80	6.15	1.60	2.15
	Chanteperdrix			20	1.20	0.80	6.50	1.66	2.40
	La Crueize			25	1.20	0.80	7.70	1.66	2.60
	Saint-Satur	Bourges à Cosne	1891-93	13	1.60	0.70	4.40	1.15	1.75

91. — Au viaduc du Blanc, cette pente atteint 24cm5.

92. — V, p. 50.

93. — V, p. 42 et suivantes.

§ 1. — *PARTIES VUES*

Art. 1. — Rôle apparent des culées. Elles arrêtent, elles encadrent l'ouvrage.

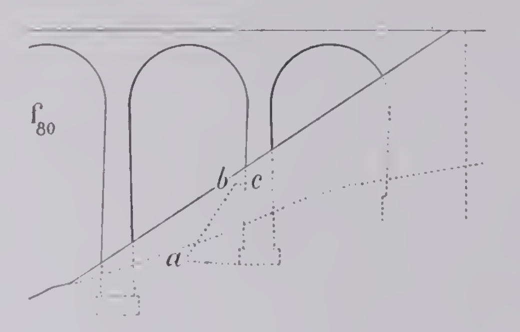
On les fera ressauter de 0m35 à 0m50 par rapport au nu des tympans (f_{78}, f_{79}) ; on les surmontera d'un parapet plein, sans plinthe. On ne comprend guère en effet une plinthe se prolongeant sur la culée et se perdant dans un quart de cône ou dans le terrain. Ces culées brutales arrêtent bien l'ouvrage[94].

Art. 2. — Quarts de cône.

On a souvent perreyé les quarts de cône pour raidir leurs talus : c'est laid et d'entretien coûteux ; on ne fera de perrés que pour les protéger contre les crues.

En principe, les quarts de cône seront à 3/2 : ce n'est qu'exceptionnellement, s'il faut réduire les murs en retour, qu'on acceptera une inclinaison de 5/4 sur leur parement ; mais alors il faudra bien pilonner les terres et gazonner leur surface.

Il est bon que sur 0m30 le quart de cône découvre le pied P de l'arête de la culée, et recouvre l'extrémité S du parapet (f_{78}).



Pour raccourcir les murs en retour, on a quelquefois noyé dans de grands quarts de cône les pieds des piles voisines (f_{80}). La dernière arche, ainsi aveuglée, est d'un aspect fort désagréable. De plus, il est arrivé que la pile voisine de la culée a été renversée par la poussée de la terre[95].

Il est prudent de buter une pile noyée dans le quart de cône par un massif *a b c*.

Il vaut mieux, s'il y a économie appréciable, porter les extrémités des murs en retour sur des consoles en pierre, ou mieux, en béton armé, qui permettent un plus grand porte-à-faux.

Ces consoles doivent être cachées dans le quart de cône[96].

Art. 3. — Fruit des parements.

Le parement antérieur des culées, quand il est vu, et les arêtes en élévation du ressaut des culées, seront au fruit de 0,025 (1/40).

Leurs faces auront le fruit moyen des tympans : si les fruits différaient, la surface de moindre fruit paraîtrait se déverser.

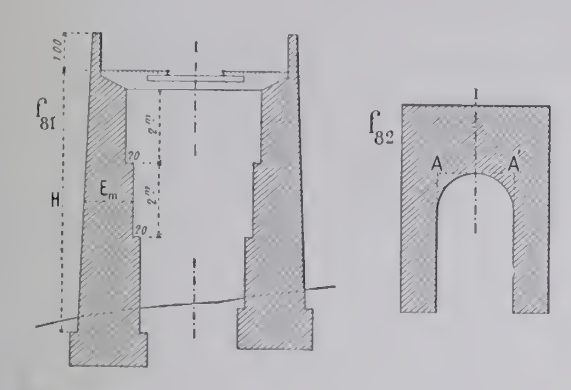
94. — V. p. 47.
95. — Pont de Pont de Bordes (Ligne de Condom à Port-Sainte-Marie).
96. — V. p. 45, 46.

§ 2. — *PARTIES CACHÉES*

Art. 1. — Culées à murs en retour indépendants.

Tant que la hauteur est faible (4 ou 5^m au plus) les deux murs en retour peuvent rester indépendants (f_{81}).

On leur donne une épaisseur moyenne : $E_m = 0{,}25\ (1 + H)$.



Leur parement caché est vertical ou avec des gradins de 0^m20 tous les 2^m environ.

Il faut, pour ne pas amorcer de fissures, adoucir les angles rentrants A et A' par des congés à grand rayon (f_{82}).

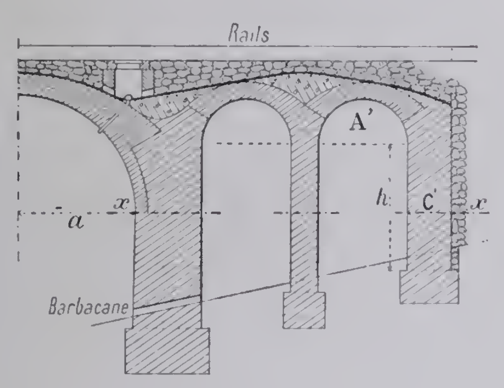
On remplit, entre les murs en retour comme entre les tympans, avec des déblais rocheux rangés à la main.

Art. 2. — Culées évidées.

A. — Types d'évidement.

Pour des hauteurs de plus de 4^m, 5^m, les murs seraient en bas très épais, l'intervalle entre leurs parements cachés, très réduit : on aurait beaucoup de maçonnerie pour peu soutenir.

f_{83}. — Coupe en long



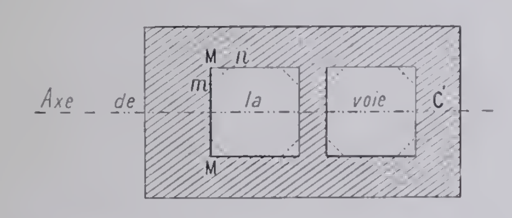
Il faut, alors, évider les culées :

soit par des voûtes à génératrices parallèles à l'axe de la voie ; elles poussent les murs en retour ; on n'en fait plus guère ;

soit par des voûtes à génératrices perpendiculaires à l'axe de la voie (évidements transversaux) ;

soit, mieux, par des puits verticaux.

f_{84}. — Coupe sur xx de f_{83}



B. — Évidements transversaux (f_{83}).

Les murs en retour ne sont plus alors que de simples masques ; leur épaisseur peut être réduite à 1^m.

L'épaisseur C' de la culée de la voûte extrême doit assurer la stabilité, sans tenir compte de la poussée des terres[97].

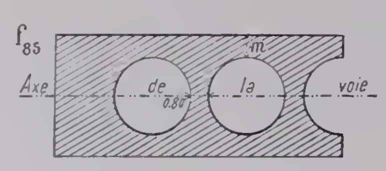
Pour prévenir les fentes aux angles rentrants M (f_{84}), on les amortit par des pans coupés *mn* ; mieux, on les arrondit. On est ainsi conduit au meilleur système d'évidement, qui est par puits verticaux.

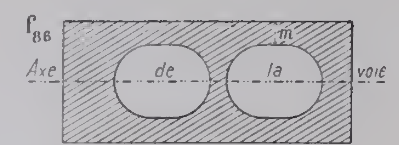
97. — On pourra accepter la formule précédemment donnée pour les ouvrages sous rails, en plein cintre, de 8^m d'ouverture et au-dessous :

$$C' = 0^m30 + 0{,}20\ A' + 0{,}20\ h.$$

C. — Puits verticaux.

Ils sont à section horizontale circulaire (f_{85}) ou, exceptionnellement, un peu allongée (f_{86}) : le grand axe dans le sens de la voie et non normalement à la voie comme on l'a fait quelquefois fort à tort.

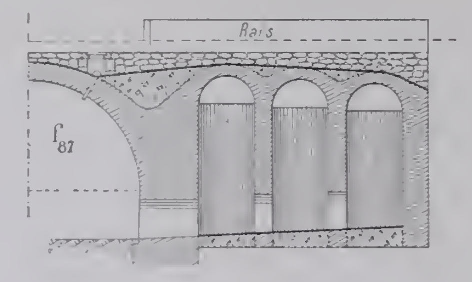




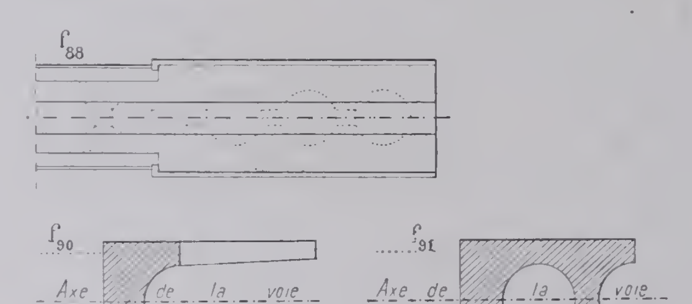
On peut réduire à 0m80 la cloison entre puits, à 1m le masque *m* (f_{85}, f_{86}).

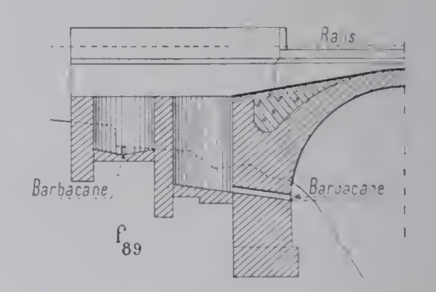
Les puits sont :

soit couverts par des voûtes sphériques ou, plus pratiquement, par des voûtes transversales en berceau : on les laisse vides ; on les aère par des soupiraux grillés, — on évacue l'eau au pied et, si c'est possible, on permet d'y accéder, par exemple par une porte percée dans la culée ou dans un des murs en retour (f_{87}, f_{88}) ;



soit ouverts ; on les remplit alors de déblais rocheux et on assure avec soin l'écoulement des eaux par des barbacanes, soit sous la dernière arche (f_{89}), soit dans une pierrée enveloppant la culée.





Art. 3. — Epaisseur des culées.

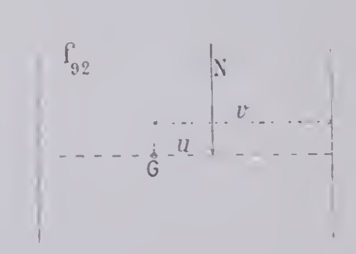
Il n'y a pas de bonne formule pour déterminer l'épaisseur d'une culée de viaduc.

On l'arrête par une épure.

Dans la résistance de la culée, on compte tout ou partie des murs en retour, les puits.

Dans f_{90}, f_{91}, on admettra que tout ce qui est « hachuré » résiste à la poussée[98].

Voici quelques dispositions de culées :



98. — Soient :

Ω la surface de la section, évidements déduits ;

G le centre de gravité de Ω à r de l'arête ;

I le moment d'inertie par rapport à l'axe transversal mené par G (déterminé en tenant compte des évidements) ;

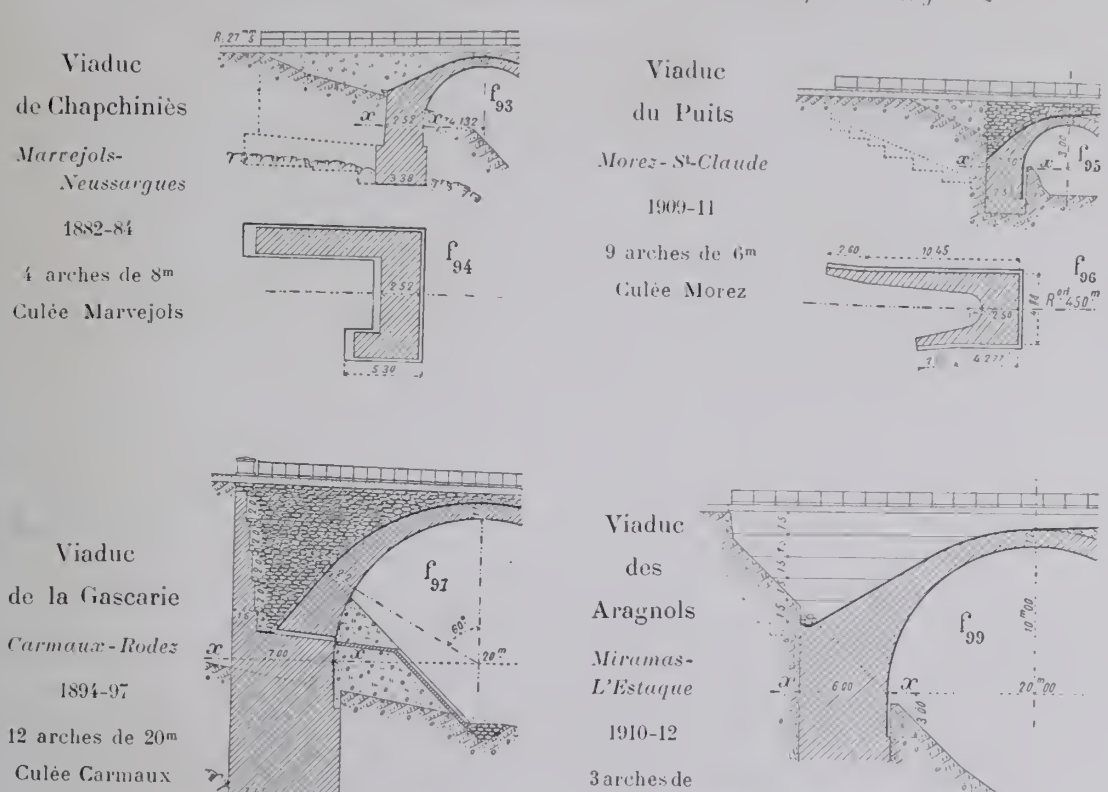
N l'effort normal agissant à u de G (f_{92}).

On calculera l'effort maximum sur l'arête par la formule ordinaire :

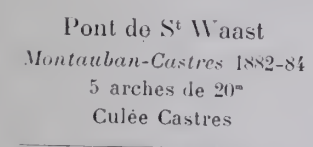
$$\max \beta = \frac{N}{\Omega}\left[1 + \frac{u\, r\, \Omega}{I}\right]$$

Culées non évidées

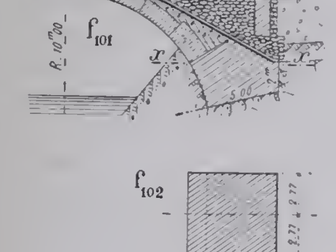
Coupes en long sur l'axe et coupes horizontales sur xx des coupes en long — 2mm



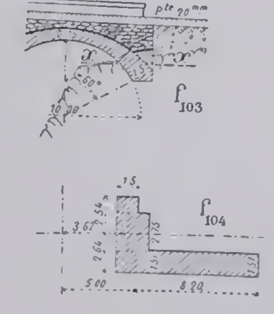
Culées perdues



Pont de St Waast
Montauban-Castres 1882-84
5 arches de 20m
Culée Castres

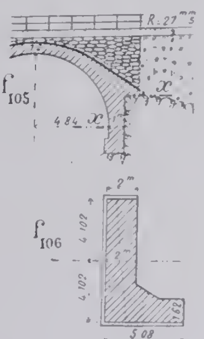


Viaduc de la Mouline
Carmaux-Rodez 1894-95
7 arches de 10m et 1 de 17m
Culée Rodez



Culée butée contre le terrain

Viaduc du Lignon
Marvejols-Neussargues 1880-82
10 arches de 10m
Culée Neussargues



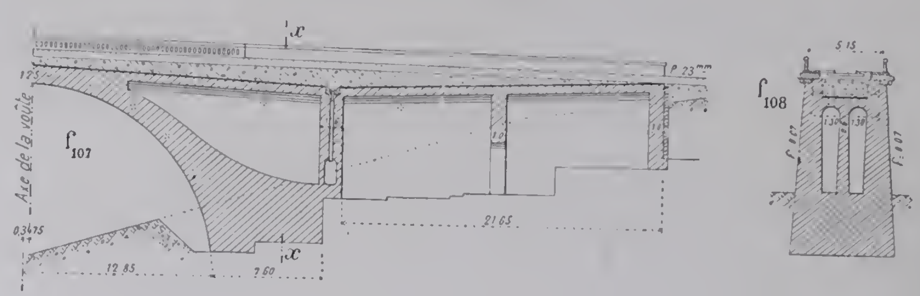
Culées élégies par des voûtes longitudinales

Coupes en long sur l'axe et coupes en travers sur xx des coupes en long — 2mm

Viaduc de Pompadour

Limoges-Brive, 1873-75 — 8 arches de 25m

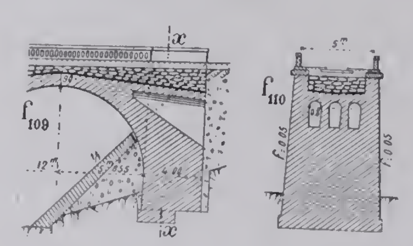
Culée Brive



Viaduc de Légaud

Eymoutiers-Meymac, 1880-81

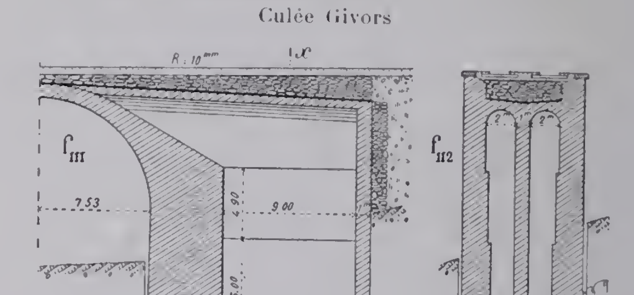
5 arches de 12m



Viaduc de Civrieux

Paray-le-Monial-Givors, 1903 — 3 arches de 15m

Culée Givors

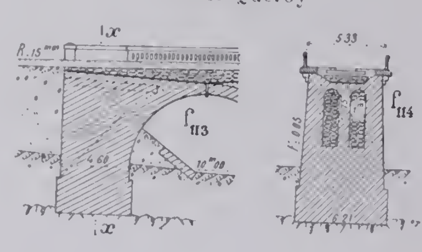


Viaduc du Bandiat

Le Quéroy-Nontron, 1882-83

3 arches de 20m50, 6 arches de 10m

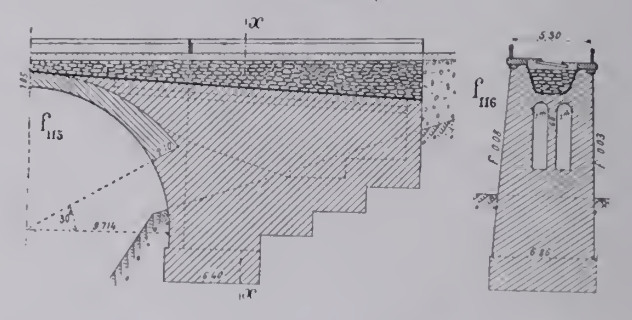
Culée Le Quéroy



Viaduc de Barajol

Bort-Neussargues, 1903-05 — 12 arches de 20m

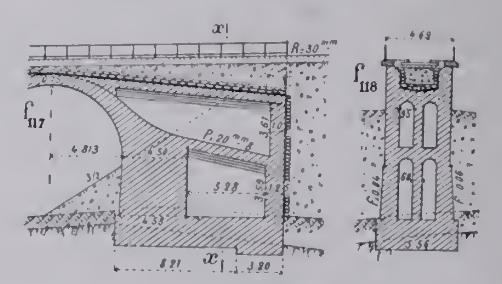
Culée Neussargues



Viaduc de Salsignac

Bort-Neussargues, 1903 — 14 arches de 10m

Culée Neussargues



Culées élégies par des voûtes transversales cachées

Coupes en long sur l'axe et coupes en travers sur xx des coupes en long — 2mm

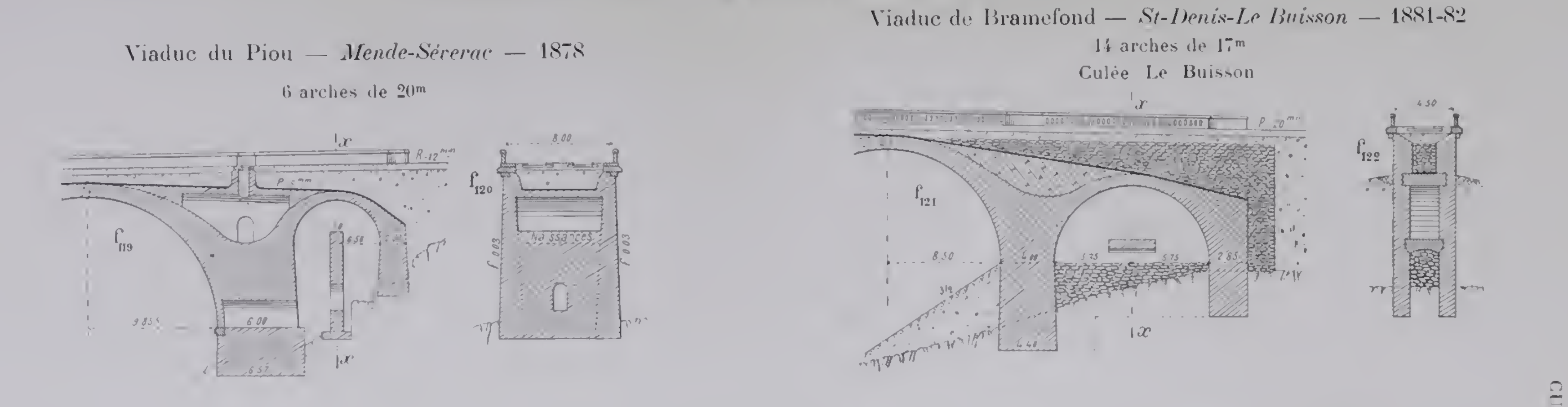
Viadue du Piou — *Mende-Sérerac* — 1878

6 arches de 20m

Viaduc de Bramefond — *St-Denis-Le Buisson* — 1881-82

14 arches de 17m

Culée Le Buisson

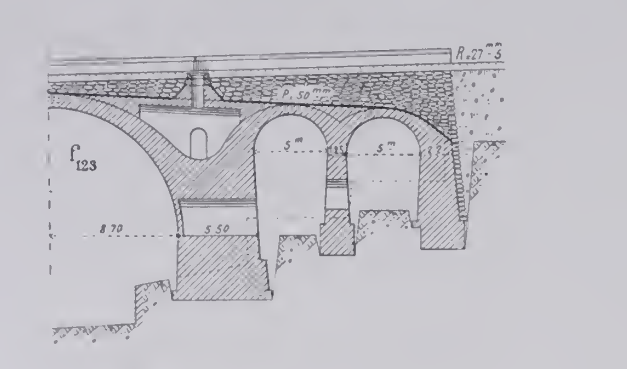


Viaduc de Sénouard

Marvejols-Neussargues — 1879-82

9 arches de 18m

Culée Neussargues



Viaduc de St-Germain-les-Belles

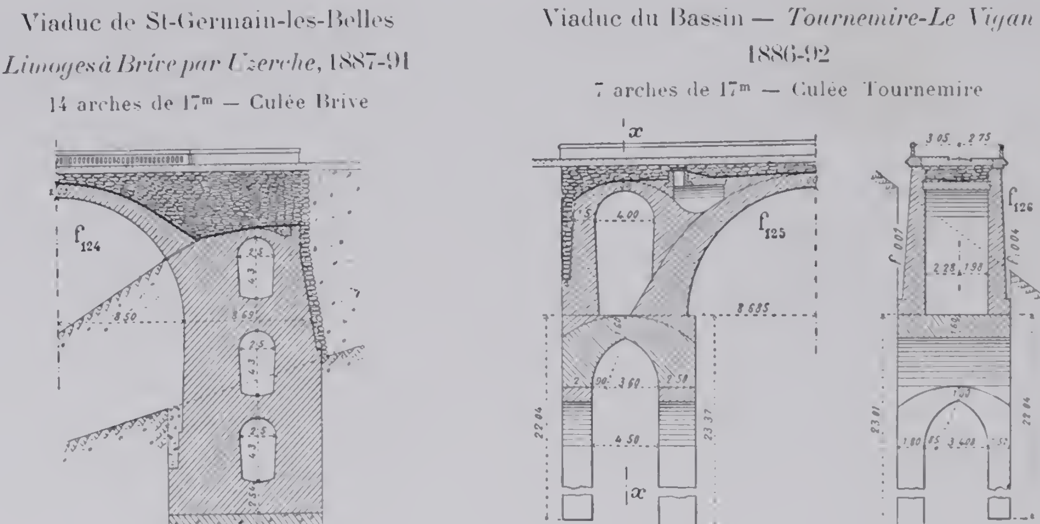
Limoges à Brive par Uzerche, 1887-91

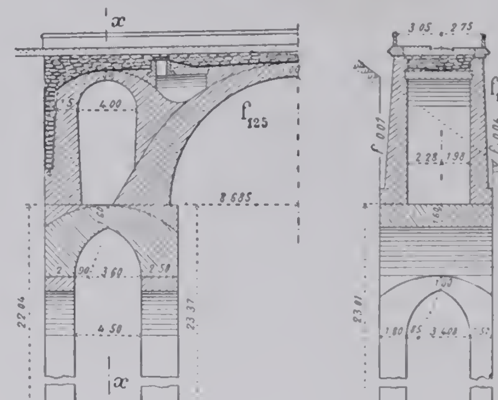
14 arches de 17m — Culée Brive

Viaduc du Bassin — *Tournemire-Le Vigan*

1886-92

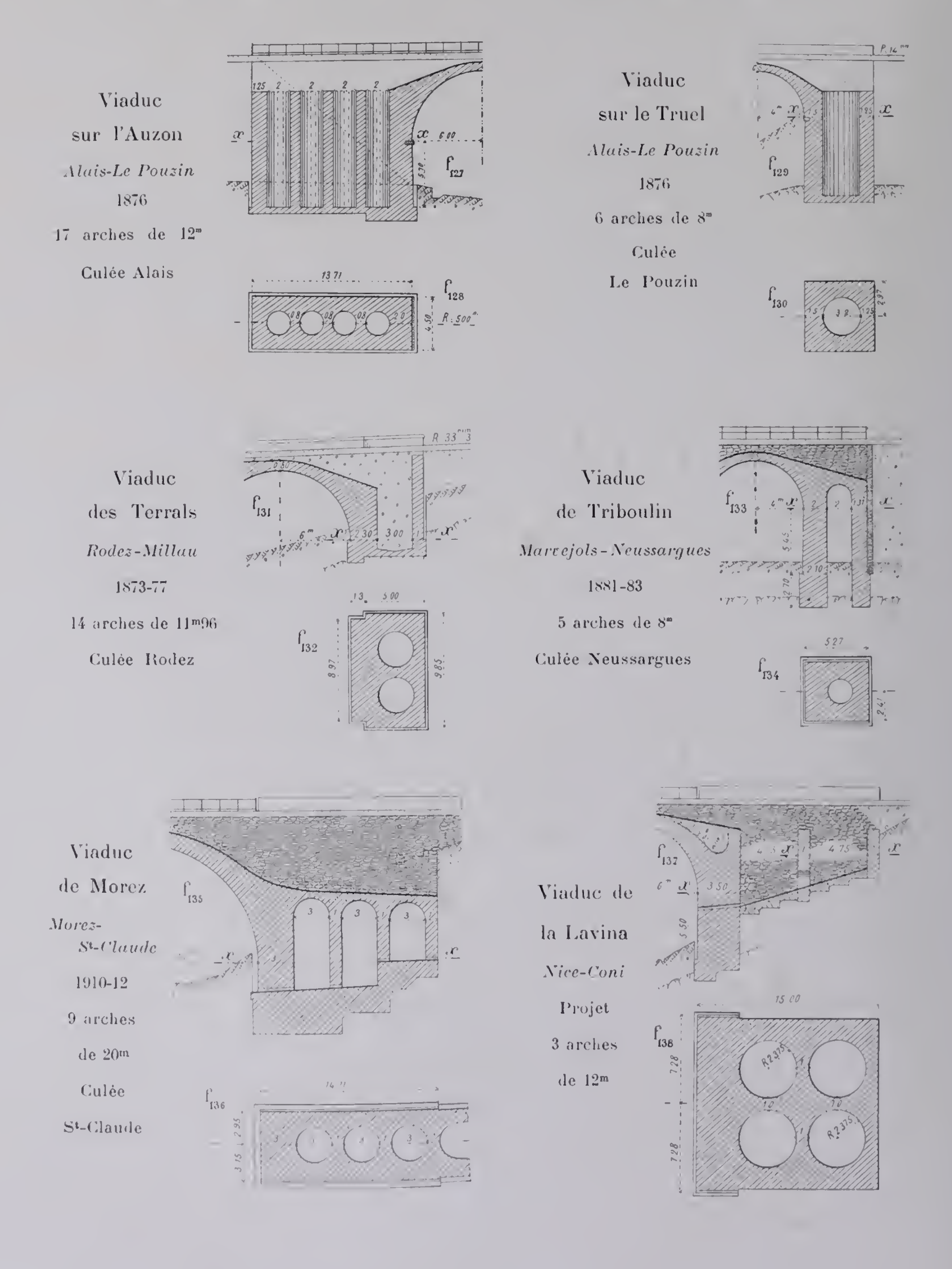
7 arches de 17m — Culée Tournemire





Culées évidées par des puits verticaux

Coupes en long sur l'axe et coupes horizontales sur xx des coupes en long — 2mm



COMMENT ON ÉVACUE L'EAU QUI TOMBE SUR LES VIADUCS

§ 1. — *CHAPES*

Art. 1. — Deux chapes sur les voûtes : la première de 3cm, en mortier de chaux ; la deuxième, de 1cm5, en asphalte.

Une bonne chape doit être imperméable.

Mais, pour qu'elle demeure telle, elle doit aussi être un peu élastique, se prêter, sans se fissurer[99], aux mouvements des voûtes sous les surcharges ou aux changements de température.

Elle sera ainsi constituée : d'abord une première chape de 3cm en mortier de chaux gâché sec et fortement « massivé »[100] ; dessus, une deuxième chape de 1cm5 en asphalte [101, 102].

Quand l'extrados des voûtes est trop irrégulier, on l'unit avant de le « chaper », par une première couche de béton fin de 5 à 6cm.

Art. 2. — Comment on empêche l'eau d'entrer sous la chape par ses bords.

Il ne suffit pas qu'une chape soit imperméable : il faut encore que l'eau ne puisse pas entrer dessous par ses bords, par exemple par A de f_{139} : une goutte d'eau, si elle entre, traversera les maçonneries.

Il faut tout au moins l'engager dans une rainure creusée dans le tympan (f_{140}).

Mieux, on remontra la chape en asphalte le long des parements et on l'engagera sous la plinthe (f_{141}).

Pour qu'elle s'applique bien et tienne sur les parements verticaux, on la fait en asphalte pur, sans sable, et on l'étend sur un enduit de 0m01 en mortier de chaux lissé à la « taloche » [103].

Art. 3. — Contre-chape pour protéger la chape.

Pour protéger une chape en asphalte, ne conviennent : ni l'argile, qui arrête l'eau ; ni le sable qui, à la longue, disparaît, entraîné par l'eau ; ni les pierres plates, qui égratignent la chape.

Le mieux paraît être une couche de 0m04 de béton très maigre : 100k de ciment par m. c. de « gravillon » bien lavé, sans sable[104].

Cette contre-chape est très poreuse, — l'eau la traverse immédiatement, — et très résistante. Elle porte sans s'écraser le remplissage et les surcharges : sur des surfaces très inclinées, elle empêche l'asphalte de couler.

99. — Pas de chape en ciment ; le ciment a du retrait et se fendille.

100. — 350k de la meilleure chaux par m. c. de sable, et 100 litres d'eau seulement. Sur l'extrados, lavé, puis épongé, mais encore humide, on applique le mortier, à l'état de sable humide ; ensuite, on le bat à la savate jusqu'à ce que l'humidité paraisse à la surface. Pour l'empêcher de sécher trop vite, on le recouvre de sable qu'on enlève après la prise.

101. — En deux couches de 7mm5. La 1re est en mastic d'asphalte ; la 2e est faite de deux parties de mastic et une partie de sable lavé et sec. Pour les deux couches, on ajoute au mastic 7 % de son poids de bitume.

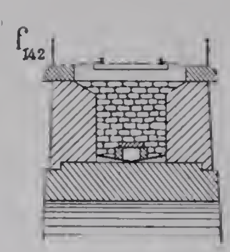
102. — On a essayé quantité de matières : feuille de plomb entre 2 cartons bitumés (isolateur Siebel) ; asphalte armé par de la toile de jute (chape Leiss-Zuffer, appliquée sur les grandes voûtes des Alpes autrichiennes, II, p. 164) ; toile de jute enduite de bitume (« Callendrite », du nom de Callender, son fabricant, — nous l'avons employée au viaduc du Crêt-Morez-St-Claude) ;....

103. — Bouclier en bois avec un manche.

104. — La Cie de l'Est a employé avec succès ce procédé pour refaire la chape du viaduc de Chaumont. Elle l'applique systématiquement à ses nouveaux ouvrages.

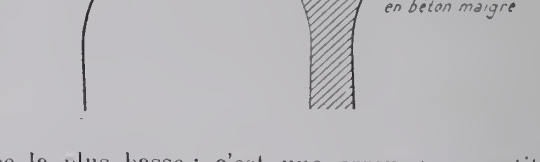
Art. 4. — Pentes de la chape, et drains pour conduire rapidement l'eau à des points bas.

Il faut, le plus vite possible, conduire l'eau à des points bas, puis dehors. En travers, on crée, avec de la maçonnerie ou plus simplement du béton maigre, deux pentes de 0,03 à 0,05 vers un petit drain en pierres sèches de 0m20 × 0m20 (f_{142}) : il a, en long, le plus de pente possible, au moins 0,05.



Art. 5. — Comment on fait passer l'eau à travers les voûtes[105].

A. — Par la clef. — Ce semble plus simple (f_{143}) : le tuyau est vertical, aussi court que possible ; les eaux ne sont pas rejetées par le vent sur la douelle.

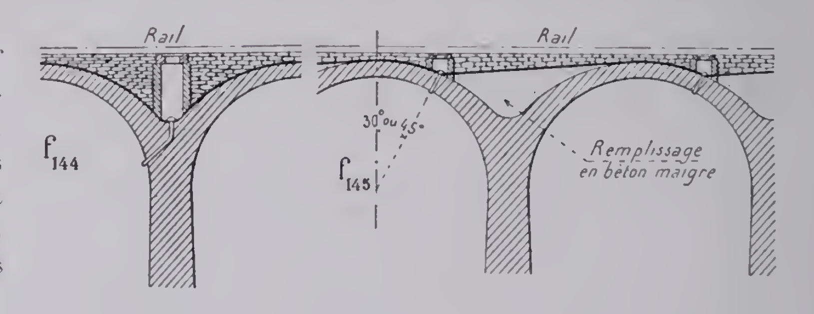


Mais, pour donner aux chapes des pentes longitudinales suffisantes, on augmente, aux dépens de l'aspect, l'épaisseur entre le rail et l'intrados des voûtes à la clef.

Sur des viaducs à très grande pente, on a quelquefois conduit toute l'eau jusqu'à la culée la plus basse ; c'est une erreur : un petit barrage de ballast terreux arrête l'eau. Il faut, au moins, un écoulement par voûte.

B. — Par les reins. — C'est le meilleur mode d'écoulement.

On a quelquefois posé directement la chape sur les extrados des voûtes (f_{144}) : ses points bas sont alors sur les axes des piles ; ils sont mieux entre 30° et 45° de la clef (f_{145}) ; l'eau est moins facilement jetée par le vent sur la douelle ou sur les piles ; la gargouille est plus courte, plus inclinée, le puits de visite moins haut.



Art. 6. — Cas de tympans évidés.

On ne fait de chape que sur les voûtes d'élégissement.

Art. 7. — Il est extrêmement important de bien faire les chapes.

L'eau, petit à petit, enlève la chaux des mortiers.

Dans des ponts à beaucoup de joints, en particulier dans des voûtes en briques, elle a produit de véritables crevasses, parce que le mortier des joints avait disparu, que des briques étaient tombées et que d'autres, constamment imbibées d'eau, avaient gelé.

C'est la chape qui conserve les ouvrages[106].

105. — On a, autrefois, conduit l'eau par un tuyau vertical placé dans l'axe des piles à un petit aqueduc traversant le pied des piles.

Pour de hauts viaducs, on avait des tuyaux très longs, impossibles à visiter, fort difficiles à déboucher. Ce dispositif n'est plus appliqué.

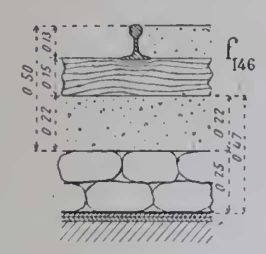
106. — V, p. 193.

Art. 8. — Remplissage au-dessus de la chape.

A. — Nature. — Voir plus haut Chap. VII, § 2, art. 2.

B. — Epaisseur au-dessus des clefs. — Elle doit garantir sûrement la chape contre toute détérioration au passage des trains ou par les outils des poseurs.

Mais un matelas épais augmente, aux dépens de l'aspect, la hauteur du tympan entre la plinthe et le bandeau : on ne dépassera pas 0m40.



C'est encore trop pour l'aspect des viaducs à petites arches (8m et au-dessous) : on pourra réduire l'épaisseur du matelas à 0m30 et même à 0m25 (soit sous traverses 0m47 f_{146}), à condition de le faire en maçonnerie à pierres sèches [107, 108].

Art. 9. — Parements cachés, non chapés.

Tous les parements cachés, non chapés, doivent être lavés, brossés, nettoyés, puis barbouillés de trois couches de coaltar.

§ 2. *GARGOUILLES.*

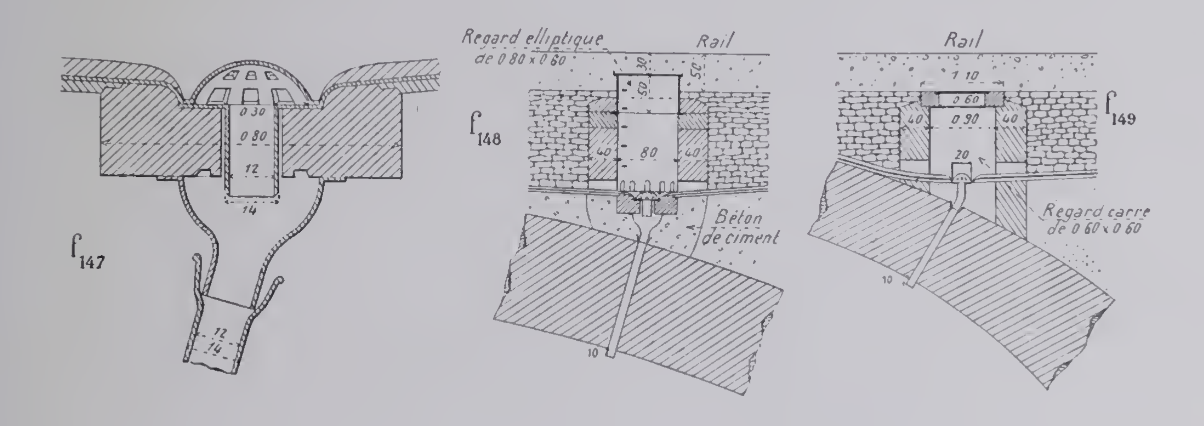
Pour visiter les gargouilles, on établit des regards (f_{148}, f_{149}) dans l'axe de la voie sur les viaducs à une voie, dans l'axe de l'entrevoie sur les viaducs à deux voies.

On les coiffe d'une crépine pour empêcher les graviers de passer au travers et les grosses pierres de les engorger (f_{147}).

On les fait dépasser d'au moins 0m10 l'intrados pour que l'eau ne soit pas rejetée par le vent sur la douelle : on « biseaute » l'about pour qu'elle tombe de suite.

Il faut empêcher l'eau de s'introduire entre la maçonnerie et la gargouille.

Voici quelques dispositifs (f_{147}, f_{148}, f_{149}) :



107. — Voir plus haut p. 21.

108. — Le matelas n'est que de 0m30 aux ponts de Lavaur et Antoinette. Les chapes n'ont pas souffert. A de petits ouvrages n'ayant sous les traverses qu'un matelas de 0m15, le Service de la Voie de la Cie d'Orléans n'a pas constaté d'avarie dans les voûtes (p. 21).

MATÉRIAUX

§ 1. — *LEUR RÉPARTITION USUELLE DANS LES DIFFÉRENTES PARTIES DU VIADUC*[109]

Désignation	Dimensions usuelles (f_{150}) — En parement — Hauteur ou Épaisseur h	En parement — Largeur l	Queue q	Retour d'équerre — Lits r_1	Retour d'équerre — Joints r_2	Abréviations	Répartition
Maçonnerie de : moellons ordinaires, en blocage, sans préparation spéciale.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$ Poids $< 40^k$					MO	Toutes les maçonneries de moellons à mortier, sauf celles qui sont spécifiées ci-dessous : gros œuvre ; remplissages ; massifs de fondation ; noyaux des piles ; corps des culées, des tympans ; parements cachés.
Maçonnerie de : moellons ordinaires, choisis, (c'est-à-dire avec sujétion.) en parement, à joints incertains.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$		$\geqslant 0^m20$	$\geqslant 0^m10$	$\geqslant 0^m10$	MOI ou MOH suivant la carrière	Parements vus des tympans, des piles, des culées sauf les angles ; parements intérieurs des regards de visite.
Maçonnerie de : moellons ordinaires, choisis, en parement, par assises horizontales grossières.	$\geqslant 0^m10$		$\geqslant 0^m20$	$\geqslant 0^m15$	$\geqslant 0^m10$	MOI ou MOH suivant la carrière	
Maçonnerie de : moellons ordinaires, choisis, en voûte, méplats, « lités » ; les lits prolongeant soit chaque lit de douelle, soit un lit sur 2, sur 3.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$			aussi pleins que possible	0^m10	MOV	Queutage des grandes voûtes[110] derrière la douelle au-dessus du quart de la montée à partir des naissances ; douelle et queutage des voûtes d'élégissement.
Maçonnerie de : moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan (f_{150}), moellons équarris par assises horizontales	$\geqslant 0^m15$ $\leqslant 0^m25$	1.5 h à 2.5 h	$\geqslant 0^m30$	0^m20	0^m15	ME	Fûts des parapets. Dans les grands viaducs, parements vus des tympans, des piles, des culées, sauf les angles.
Maçonnerie de : moellons à face rectangulaire, moellons équarris taillés en voussoirs	Fixée par le dessin $\geqslant 0^m15$ $\leqslant 0^m25$	1.5 h à 2.5 h	$\geqslant 0^m30$	Pleins	0^m20	MEV	Douelle des voûtes.[111]
Maçonnerie de : moellons à face rectangulaire, moellons d'appareil par assises horizontales	Dimensions indiquées aux dessins			Pleins		MA	Angles des piles, des culées, angles et bahuts des parapets sur culées.
Maçonnerie de : moellons à face rectangulaire, moellons d'appareil taillés en voussoirs	Dimensions indiquées aux dessins			Pleins		MAV	Bandeaux des voûtes (p. 54).
Maçonnerie de : libages.	Dimensions indiquées aux dessins			Pleins		L	Dés pour sceller les garde-corps entre grands murs de soutènement (p. 49).
Maçonnerie de : pierre de taille.	Dimensions indiquées aux dessins			Pleins		PT	Plinthes, sous-plinthes, corbeaux des refuges, couronnement des regards de visite, logement des crépines des gargouilles.
Béton de chaux.	»					B	En fondation à la place du « MO », s'il coûte sensiblement moins.
Béton de ciment.	»					BC'	Autour des gargouilles.
Béton maigre.	»					BM	Entre tympans sous les chapes ; radiers des puits des culées.
Chapes et enduits : Chape de 0^m03 d'épaisseur en mortier de chaux massivé.	»					»	Extrados des voûtes, revers d'eau des tympans et des murs en retour, radier des puits des culées.
Chapes et enduits : Enduit de 0^m01 d'épais^r en mortier de chaux taloché. / 0^m02 d'épaisseur en mortier de ciment.	»					»	Parements cachés des tympans. Sur l'extrados des grandes voûtes sous les voûtes d'évidement.
Chapes et enduits : Chape de 0^m015 d'épaisseur en asphalte.	»					»	Sur les chapes en mortier de chaux de 0^m03 et sur l'enduit en mortier de chaux derrière les tympans.
Chapes et enduits : Contre-chape de 0^m04 d'épaisseur en béton maigre de gravillon et de ciment (p. 79) (100^k de ciment pour 1^{mc} de gravillon sans sable).	»					»	Sur la chape en asphalte des voûtes.
Chapes et enduits : 3 couches de coaltar.	»					»	Tous les parements cachés non recouverts d'une chape en asphalte.
Pierres sèches rangées à la main.	»					PS	Entre tympans au-dessus des chapes ; chemises derrière les culées et les murs en retour ; remplissage des puits des culées quand ils ne sont pas couverts par des voûtes.

109. — Donnée pour les maçonneries des Grands ouvrages Tome V, p. 7.
110. — V, p. 15, 19   111. — V, p. 18.

§ 2. *QUELQUES DÉTAILS D'APPAREIL*

Art. 1. — Douelle des voûtes[112].

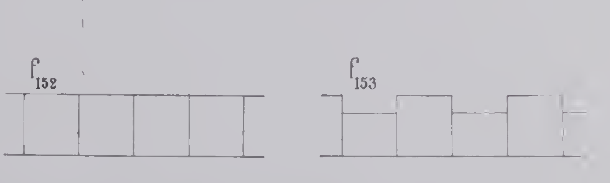
Les moellons équarris (MEV) ont leurs lits dressés normalement à la douelle sans démaigrissement sur toute leur longueur, leurs joints retournés d'équerre sur 0m25 au moins.

Tous les MEV d'une même assise ont la même queue. Il y aura toute une assise courte, — puis toute une assise longue.

La découpe, de 0m10 au moins, est d'une assise à l'autre, et non entre deux moellons d'une même assise.

Une coupe suivant xx de f_{151} sera f_{152} et non f_{153}.

Avec f_{152}, on lie beaucoup mieux la douelle à son queutage.



Art. 2. — Assises de libages coupant les piles.

On a souvent coupé les hautes piles, tous les 8 à 10m, par des assises de libages[113].

Elles ont pour objet de mieux répartir la pression et d'arrêter, s'il s'en produisait, une fissure verticale[114].

On a fait, sans assises de libages, de très grandes piles avec parements, soit assisés[115], soit à joints incertains[116].

Peut-être ne sont-elles utiles que dans les très hauts viaducs à parements non assisés, tout entiers en moellons ordinaires, surtout en béton[117]; peut-être pourrait-on les y remplacer par des assises en béton armé[118].

112. — V, p. 18.

113. — Viaduc de la Fure, projeté en 1855 par Tony Fontenay (Ligne de Lyon à Grenoble).
Viaduc de Mussy (Ligne de Paray-le-Monial à Givors, 1892-1895): les libages des assises y sont cramponnés les uns aux autres.
On en a mis tous les 10m environ aux viaducs des lignes de Coire à Saint-Maurice (Albula Bahn. *Denkschrift im Auftrage der Rhätischen-Bahn*, zusammen gestellt von Profr-Dr Hennings, — Coire 1908);
et du lac de Constance à celui de Zurich (Bodensee-Toggenburg-Zürichsee-*Denkschrift über die Eisenbahn Verbindung Romanshorn St-Gallen-Wattwill-Uznach*, Saint-Gall, 1911, p. 94, Pl. 8, 9);
à ceux des nouvelles lignes des chemins de fer Rhétiques : Ilanz-Disentis et Bevers-Schuls, *Schweiz. Bauzeitung, 20 avril et 4 mai 1912;*
au viaduc de Castieler de la ligne de Coire à Arosa, *Schweiz. Bauzeitung, 19 juin 1915.*

114. — On a dit que les « assises de liaison », qui, elles, ne « soufflent » pas, retiennent par frottement les autres maçonneries et frettent la pile.

115. — Pompadour (Brive à Limoges) H'=55m, Saint-Laurent (Sèverac à Marvejols) H'=53m, La Crueize (Marvejols à Neussargues) H'=63m, Les Fades (Saint-Eloi à Pauniat) piles de 92m sous travées métalliques.

116. — La Gascarie (Carmaux à Rodez) H'=49m, Arquejols (Le Puy-Langogne) H'=45m.

117. — Comme on coupe par des assises de briques des maçonneries de galets.

118. — Tranches armées de piles de viaducs construits par M. l'Ingénieur en Chef Harel de la Noë.

§ 3. — *PAREMENTS*

Art. 1. — Façon.

A. — Taille plate.

On n'emploiera la taille plate que dans des villes ou quand la pierre ne permettra pas d'obtenir de bons bossages.

Les faces plates seront striées et non picotées dans tous les sens. Les stries de taille seront régulièrement espacées et toutes inclinées à 45°. Dans un ouvrage, les stries seront dans le même sens.

La pierre de taille des viaducs courants (plinthes, refuges), ne sera pas bouchardée, mais dressée à la pointe.

On ne bouchardera que le dessus des plinthes, parce qu'il sert de trottoir : des stries peuvent retenir l'eau, qui gèlerait en hiver.

ϕ_4. — Viaduc du Caty[119]
taille plate



ϕ_5. — Viaduc des Planches[120]
bossages



B. — Bossages.

Les grandes surfaces plates sont ennuyeuses : il faut les accidenter, les égayer par des bossages (ϕ_5).

Les moellons des piles et des bandeaux auront des bossages de 0m03 ou 0m04 ; ceux des culées, des bossages de 0m05 à 0m06 en moyenne ; — plus même, entre de grands rochers.

On a presque toujours taillé plats les moellons de douelle pour qu'ils s'appuient bien sur le cintre. Une douelle plate est désagréable au-dessus de piles à bossages : on y peut très bien accepter un léger bossage de 0m02 qui impose peu de sujétion.

C. — Ciselures.

On n'entourera jamais d'une ciselure la face d'un moellon, même les moellons d'angles ; on n'en fera que pour bien dresser les arêtes des piles, des culées, de l'intrados du bandeau ; elles auront, sur chaque face, 0m02 à 0m03 de largeur.

Art. 2. — Couleur.

On emploiera les mêmes matériaux dans toutes les parties du viaduc. S'il en faut employer de couleurs différentes, on les distribuera au mieux pour l'aspect : des bandeaux en pierre sombre font parfois bien.

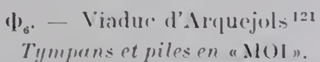
On ne fera pas d'arêtes de piles en « MA » noirs ou blancs encadrant des ME, des MO blancs ou noirs.

119. — Montauban à Castres 1883-85.

120. — Lozanne à Givors 1902-05. Le cordon et les corbeaux des naissances sont de trop.

Art. 3. — Piles et tympans.

Pour les viaducs courants, les parements des piles et tympans seront, suivant les carrières, en moellons ordinaires de choix à joints incertains (MOI), ou par assises (MOH).



Φ₆. — Viaduc d'Arquejols[121]
Tympans et piles en « MOI ».



Φ₇. — Viaduc de Morez[122]
Tympans, piles, douelles en ME à bossages.



Pour la stabilité d'un très grand viaduc, on pourra les faire en moellons équarris (ME).

Mais, dans tous les cas, les tympans et les piles (tout au moins leurs faces en élévation) seront parementés avec les mêmes matériaux, c'est-à-dire tous deux en MOH ou tous deux en MOI, ou tous deux en ME. Si l'on n'avait pas assez de l'un des matériaux pour faire tous les parements, on ferait en MOH les piles, en MOI les tympans, — autant que possible, de même couleur. Peut-être conviendrait-il alors d'accepter, malgré qu'on en eût, un cordon aux naissances pour les séparer, parce qu'il est choquant de mettre l'une au-dessus de l'autre deux maçonneries différentes, sans les séparer par quelque chose. Ceci ne s'applique qu'aux piles très épaisses, aux naissances desquelles il y a un grand intervalle entre les extrados des bandeaux.

Les angles des piles et des culées ne se distingueront en rien des parements voisins : mêmes bossages, même aspect, même carrière, même couleur... Si les faces étaient en MOI, les angles resteraient en MA, mais taillés de façon à ne pas trop se distinguer des MOI (Φ_6)

Les angles n'auront *jamais* de saillie sur les parements qu'ils encadrent : elle rend confus l'aspect de l'ouvrage. Si on les fait en gros matériaux (libages, pierres de taille), on prépare des lézardes : c'est mauvais, laid, cher.

Art. 4. — Culées.

Il convient que les murs en retour soient plus rustiques, plus vigoureux que les tympans. On y pourra mettre des moellons assisés à bossages à côté de tympans en « opus incertum » plat qui est moins ferme ; on a même, à côté de tympans en moellons assisés, revêtu des culées en « opus incertum » ; mais il y faut de gros moellons et de gros bossages.

121. — Langogne au Puy 1905-12, arches de 16ᵐ, H' maxima 49ᵐ.

122. — Morez-Sᵗ-Claude 1908-12, arches de 20ᵐ, H' maxima 40ᵐ50. On n'en imitera pas les évidements.

TITRE II

DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VIADUCS EN COURBE

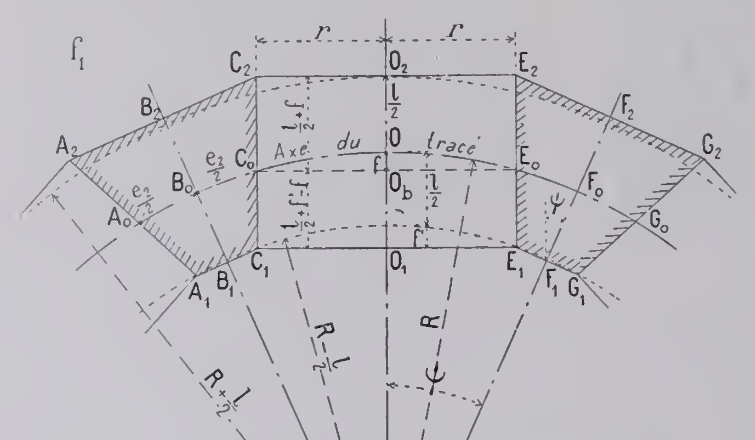
CHAPITRE I

VOÛTES EN BERCEAU — TRACÉ DES TYMPANS

§ 1. — *TYMPANS A FACETTES*

CHAQUE FACETTE PLANE ET PARALLÈLE A LA CORDE DU TRACÉ SUR LA PORTÉE DES ARCHES, OU SUR LA LARGEUR DES PILES

Menons deux arcs concentriques au tracé, à $\frac{l}{2}$ de part et d'autre (f_1). Les polygones $A_1 C_1 E_1 G_1$ inscrit dans l'arc concave, $A_2 C_2 E_2 G_2$ enveloppant l'arc convexe, sont des horizontales des deux tympans.



La section des piles aux naissances est un trapèze ; sa largeur est :

sur l'axe, e_2,

et très approximativement :

sur la face concave

$e_2 - l \sin \psi$

sur la face convexe

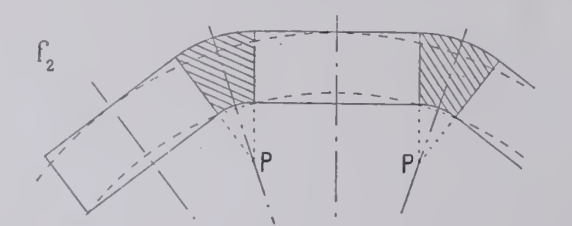
$e_2 + l \sin \psi$

La différence d'épaisseur des deux faces est $2l \sin \psi$.

La voûte est en berceau sur le rectangle $C_1 E_1 C_2 E_2$.

Les bandeaux sont plans.

La largeur des voûtes entre têtes est augmentée de la flèche $f = \frac{r^2}{2R}$



Les tympans présentent une suite de facettes d'aspect peu agréable quand, — ce qui est le cas général, — elles ne sont pas dissimulées par des contreforts.

En exécution, on arrondit les angles. On peut aussi tracer les faces des piles suivant deux arcs de cercle de centre P (f_2)[1]

Malgré ses défauts, c'est ce système qui a été le plus employé.

1. — Viaduc de Morez (Ligne de Morez à Saint-Claude), 1909. $2r = 20^m$, $e_2 = 4^m624$, $R = 250^m$.

§ 2. — *TYMPAN CONVEXE EN COURBE AVEC UN FRUIT SUFFISANT POUR QUE LA CLEF NE SOIT PAS EN PORTE-A-FAUX PAR RAPPORT A UN AUTRE POINT DE L'INTRADOS*

Art. 1. — Nécessité de ce fruit.

Si le tympan convexe était dressé suivant un cylindre ayant comme rayon $R + \frac{l}{2}$ (f_3), le bandeau serait tout entier en porte-à-faux par rapport à la corde AA'. Le porte-à-faux est maximum à la clef ; il y est :

$$f' = \frac{r^2}{2R + l} \quad \text{ou, à très peu près :} \quad \frac{r^2}{2R}$$

Pour le réduire, on donne du fruit au tympan, fruit qui, d'ailleurs, résiste au renversement des murs de tête sous l'action de la force centrifuge.

Cherchons le fruit minimum à adopter pour que, à l'intrados du bandeau convexe, la clef ne soit pas en porte-à-faux par rapport à un autre point.

Art. 2. — Surface conique du tympan convexe.

A. — Définition.

Soit O_1 (f_4), le centre de la courbe du tracé.

Dans le plan horizontal de O_1, traçons l'arc ABC de rayon $R + \frac{l}{2}$, dressons le parement du tympan convexe suivant un cône de révolution dont l'axe est la verticale du centre O_1, et dont les génératrices ont le fruit φ.

B. — Intersection de la surface conique du tympan convexe avec la douelle de la voûte.

Ses équations sont (axes Ox, Oy, Oz, plan des naissances xOy, f_4) :

cône du tympan

$$x^2 + (y + R)^2 = \left[R + \frac{l}{2} + \varphi\,(h + r - z)\right]^2$$

cylindre de douelle

$$x^2 + z^2 = r^2$$

$O_2\ O_1\ O_3\ O\ y$ plan vertical de la génératrice de clef.

$x_1\ O_1\ y_1$ plan horizontal du dessous du rail.

$x\ O\ y$ plan horizontal des naissances.

S dessous de la clef à la tête.

C. — Projection de cette intersection sur le plan vertical de la génératrice de clef (f_5, f_6).

Éliminons x^2

$$z^2-(R+y)^2+\left[R+\frac{l}{2}+\varphi(h+r-z)\right]^2-r^2=0$$

hyperbole à axes vertical et horizontal. Son inclinaison sur la verticale est :

$$\text{Tang } \psi = \frac{z-\varphi\left[R+\frac{l}{2}+\varphi(h+r-z)\right]}{R+y}$$

au sommet S $\quad z=r \quad y=\frac{l}{2}+\varphi h$

$$\text{Tang } \psi_s = \frac{r}{R+\frac{l}{2}+\varphi h}-\varphi \qquad \text{soit, en négligeant } \frac{l}{2}+\varphi h \text{ devant R,} \quad \frac{r}{R}-\varphi$$

aux naissances N $\quad z=0 \quad y=\frac{l}{2}+(r+h)\varphi-f' \quad$ (flèche du tracé sur la corde $2r=\frac{r^2}{2R}$)

$$\text{Tang } \psi_N = -\varphi\frac{R+\frac{l}{2}+(r+h)\varphi}{R+\frac{l}{2}+(r+h)\varphi-f'}$$

soit pratiqt φ, fruit de la génératrice du tympan.

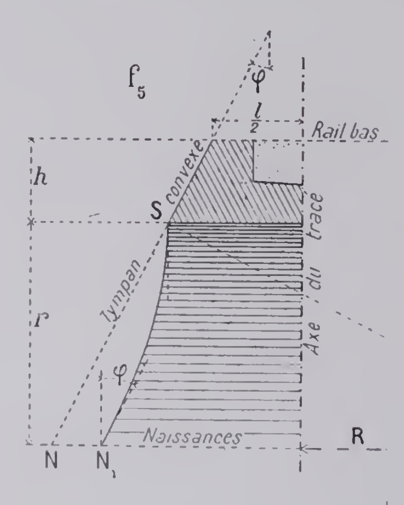
Si l'intrados est une ellipse de portée $2a$, de montée b, on trouve :

$$\text{Tang } \psi_s = \frac{a^2}{b}\left(\text{rayon de courbure à la clef}\right)-\varphi$$

Si c'est un arc de rayon r, $\quad \text{Tang } \psi_s = \frac{r}{R}-\varphi$

Art. 3. — Condition pour qu'il n'y ait pas de porte-à-faux

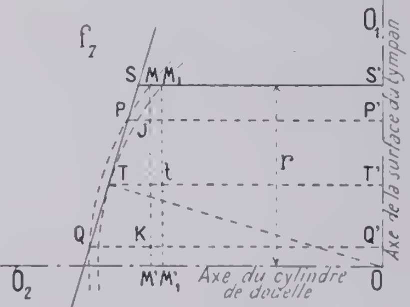
A. — La coupe en travers du tympan est une droite de fruit φ. *Il faut :* $\varphi \geqslant \frac{r}{R}$



Pour qu'il n'y ait pas de porte-à-faux, il suffit que la tangente à la clef soit verticale, c'est-à-dire que la clef soit le sommet de l'hyperbole, laquelle sera ainsi tout entière d'un même côté par rapport à cette tangente verticale (f_5).

$$\text{Soit } \varphi \geqslant \frac{r}{R}$$ [2]

(r rayon de l'intrados s'il est en plein cintre ou en arc, rayon de courbure au sommet s'il est en ellipse).

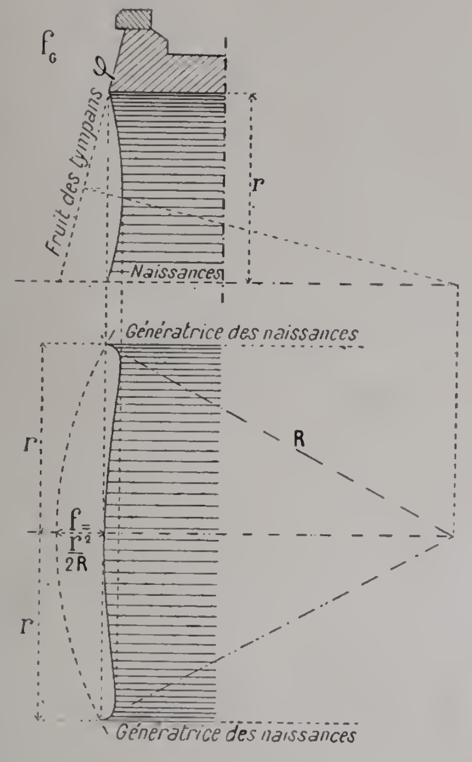


2. — En construisant l'intersection, on retrouve cette règle.

Soient : OO_2 l'axe du cylindre de douelle, OO_1 celui du cône du tympan (f_7). Une sphère de centre O coupe le cône suivant deux circonférences PP', QQ', la douelle suivant MM' : J et K sont deux points de l'intersection.

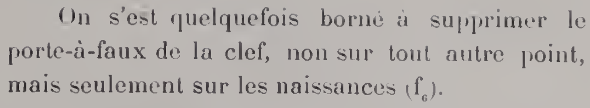
Abaissons de O la perpendiculaire OT. La sphère de rayon OT coupe le cône suivant la circonférence TT' (les deux circonférences PP', QQ' sont réduites à une), la douelle suivant $M_1M'_1$. Ces deux lignes se coupent en t.

$M_1M'_1$ est la tangente verticale à la projection de l'intersection, laquelle projection est tout entière à sa gauche. Ce qui est au-dessus du point t est en porte-à-faux. Le point t doit donc être au sommet S ou plus haut : $\varphi \geqslant \frac{r}{R+\frac{l}{2}+\varphi h}$, pratiquement $\geqslant \frac{r}{R}$



On s'est quelquefois borné à supprimer le porte-à-faux de la clef, non sur tout autre point, mais seulement sur les naissances (f_6).

Il suffit alors d'un fruit qui place la clef sur la verticale des naissances :



$$\varphi \times r \text{ (montée)} \geqslant \frac{r^2}{2R} \text{ (flèche)}$$

$$\text{ou } \varphi \geqslant \frac{r}{2R} \text{ [3]}$$

C'est la moitié du fruit précédent ; mais la clef est en porte-à-faux par rapport aux reins.

B. — La coupe en travers du tympan convexe est une parabole. — Soit φ_s son fruit au niveau du sommet de la voûte. Il faut : $\varphi_s \geqslant \frac{r}{R}$

Le tympan est une surface de révolution ayant pour axe la verticale du centre du tracé et pour méridienne, dans le plan vertical passant par l'axe de la voûte, la parabole SN (f_8).

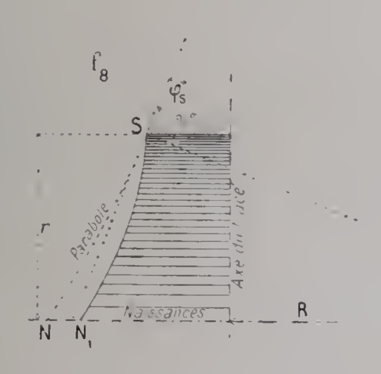
Soit φ_s l'inclinaison sur la verticale de la tangente à cette parabole au niveau du sommet de la voûte S,

Pratiquement,

SN_1, projection de la courbe de tête, est

en S, verticale pour $\varphi_s = \frac{r}{R}$

en N_1, parallèle à la parabole en N.



Art. 4. — Tracé du tympan convexe suivant le rapport $\frac{r}{R}$.

A. — Table de $\frac{r}{R}$.

La table T_4 (Appendice 3e partie) donne φ pour $2r$ (portée) de 4m à 60m, et R (rayon du tracé) de 150m à 800m.

Le fruit de 60mm est un peu fort : on l'acceptera plutôt que de briser les tympans. Mais, en dépit de quelques exemples contraires, on ne le dépassera pas ; un fruit plus grand est disgracieux ; de plus il oblige à donner au moins le même fruit initial aux piles, et ainsi augmente inutilement leur cube.

B. $\frac{r}{R} \leqslant 60^{mm}$.

On dressera le tympan convexe suivant une surface de révolution ayant pour axe la verticale du centre du tracé et pour méridienne :

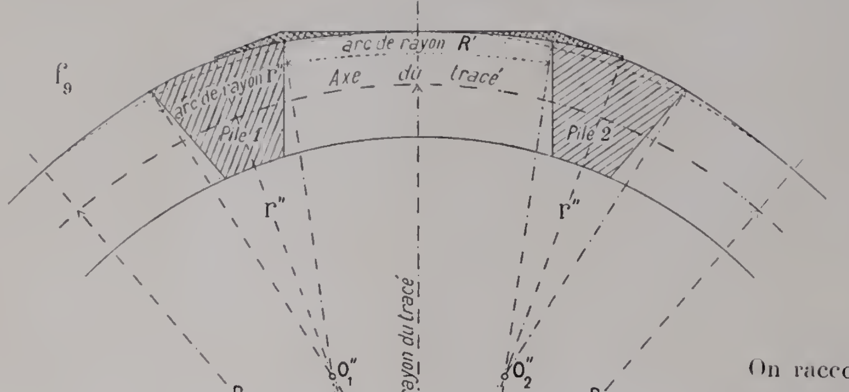
soit une droite de fruit φ tel que : $\frac{r}{R} \leqslant \varphi \leqslant 60^{mm}$

soit une parabole dont la tangente sous la plinthe ait ce même fruit.

On choisira d'après les règles données p. 68 pour les viaducs en alignement droit.

3. — C'est ce qu'a fait M. Barrand, alors Ingénieur en chef, au viaduc de Revigny (arches de 12m, en courbe de 100m, Tramway de Lons-le-Saulnier à St-Claude et à Orgelet).

C. $\frac{r}{R} > 60^{mm}$



f_9

Pour rayon en plan du tympan convexe, sur la portée de chaque voûte, on prend, non plus le rayon R du tracé, mais le rayon plus grand R', tel que :

$$\frac{r}{R'} = \varphi' = 60^{mm} \text{ [1]}$$

On raccorde sur la largeur de la pile les courbes de rayon R' de deux voûtes voisines (même rayon R', mais centres différents) par un arc de rayon r'', de centre O'' (f_9).

C'est d'un meilleur aspect que les tympans à facettes (p. 86), et moins cher du volume indiqué par des hachures croisées.

§ 3. — *TYMPAN CONCAVE EN COURBE*

On pourrait le dresser suivant un cylindre vertical ayant comme rayon $R - \frac{l}{2}$: il n'y aurait pas de porte-à-faux ; mais il convient pour l'aspect qu'il y ait un peu de fruit.

On le profilera comme il l'eut été en alignement; on en pourra réduire un peu le fruit.

Si en alignement c'eut été un plan de fruit φ', on le dressera suivant un cône (f_{10}) de ce fruit.

f_{10}

Son équation est (axes O'x, O'y, O'z — xO'y, plan des naissances) :

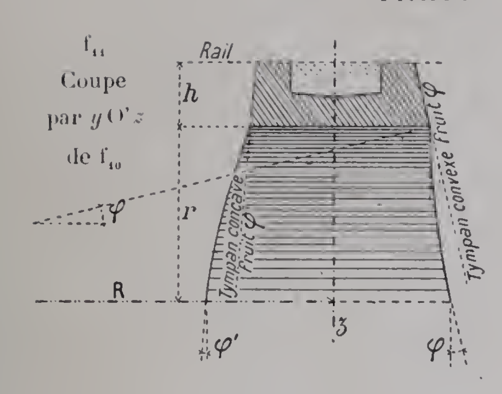
$$x^2 + (R - y)^2 = \left[R - \frac{l}{2} - \varphi' (h \pm r - z) \right]^2$$

celle de la douelle $x^2 + z^2 = r^2$

celle de la projection de leur intersection sur yO'z :

$$z^2 - (R - y)^2 + \left[R - \frac{l}{2} - \varphi' (h + r - z) \right]^2 - r^2 = 0$$

1. — Table T_4.



$\mathfrak{f}_{11}$ Coupe par yO'z de $\mathfrak{f}_{10}$

Cette hyperbole est inclinée sur la verticale de :

$$\text{Tang } \psi' = \frac{z + \left\{ R - \frac{l}{2} - \varphi' (h + r - z) \right\} \varphi'}{R - y}$$

au sommet S $\quad z = r \quad y = \frac{l}{2} + h\,\varphi'$

$$\text{Tang } \psi_s' = \left[\varphi' + \frac{r}{R - \frac{l}{2} \varphi' h} \right] \quad \text{pratiq}^t \ \varphi' + \frac{r}{R}$$

aux naissances $\quad z = 0 \quad y = \frac{l}{2} + (r + h)\,\varphi'$

$$\text{Tang } \psi_N' = \varphi'$$

CHAPITRE II

VOÛTES NON EN BERCEAU

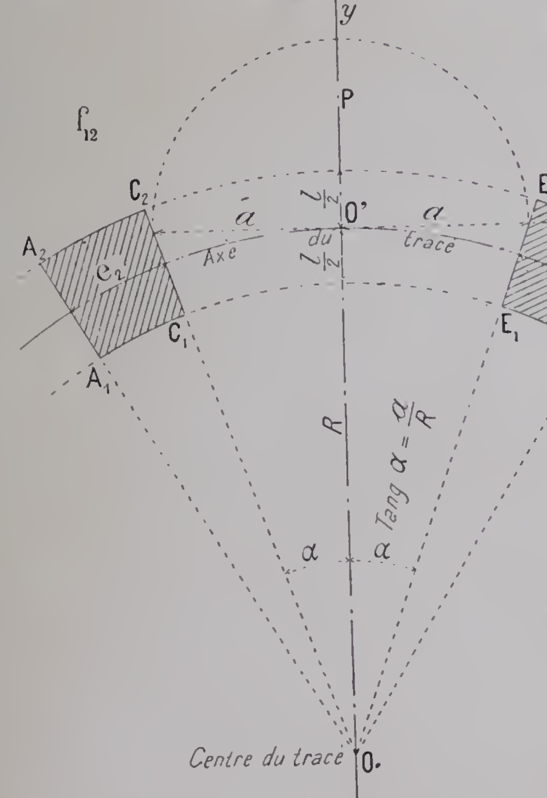
AVEC GÉNÉRATRICES DES NAISSANCES CONVERGEANT AU CENTRE DE LA COURBE DU TRACÉ

Art. 1. — **Avec les voûtes en berceau, il peut y avoir une différence exagérée entre les largeurs d'une pile à chaque tête.**

Cette différence ($\mathfrak{f}_1$) $E_2 G_2 - E_1 G_1$ est $2l \sin \psi$,
soit, à peu de chose près : $\left(1 + \frac{2r \text{ (ou } 2a)}{e_2}\right) \frac{e_2 \, l}{R}$

e_2 est très généralement 0,20 ($2r$).

La différence d'épaisseur est $6 \frac{e_2 \, l}{R}$: elle peut être telle que les piles soient à une tête trop grêles, à l'autre trop larges.



On atténue ce défaut en faisant converger $E_2 E_1$, $G_2 G_1$ sur la verticale du centre du tracé ($\mathfrak{f}_{12}$).

La surface à couvrir par la voûte est le trapèze $C_1 C_2 E_2 E_1$ (au lieu du rectangle $C_1 C_2 E_2 E_1$ de $\mathfrak{f}_1$).

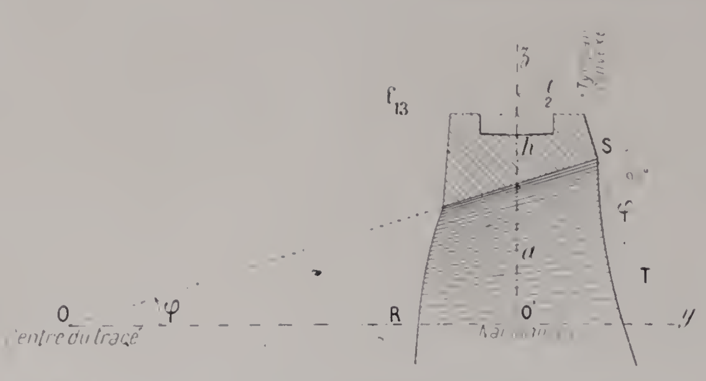
La différence d'épaisseur $E_2 G_2 - E_1 G_1$ est $\frac{e_2 \, l}{R}$, soit 6 fois moindre [5].

Art. 2. — **Douelle en cône.**

On peut dresser l'intrados suivant un cône ayant son sommet ($\mathfrak{f}_{12}$, $\mathfrak{f}_{13}$) au point O où la verticale du centre du tracé perce le plan des naissances, pour axe l'horizontale R.

Si le fruit φ du tympan convexe est $\frac{a}{R}$, la génératrice supérieure du cône d'intrados OS est perpendiculaire à la génératrice du cône du tympan ST ($\mathfrak{f}_{13}$).

5. — Soient $2a = 2r = 20^m$, $e_2 = 4^m$, $R = 300^m$, $l = 8^m$. La différence entre les épaisseurs aux 2 têtes d'une pile aux naissances est 0m642 pour la voûte en berceau, 0m107 pour l'autre.



On trouve pour l'équation (axes $O'x$, $O'y$, $O'z$) :

de la surface du tympan convexe :

$$x^2+(R+y)^2=\left[R+\frac{l}{2}+(a+h-z)\varphi\right]^2$$

de la douelle :

$$x^2+z^2=\frac{a^2}{R^2}(R+y)^2$$

de la projection de leur intersection sur le plan $yO'z$

$$(R+y)^2\left(1+\frac{a^2}{R^2}\right)=z^2+\left[R+\frac{l}{2}+(a+h-z)\varphi\right]^2$$

L'inclinaison de cette hyperbole sur la verticale est :

$$\text{Tang}\ \psi=\frac{z(1+\varphi^2)-\left(R+\frac{l}{2}\right)\varphi-(a+h)\varphi^2}{(R+y)\left(1+\frac{a^2}{R^2}\right)}$$

au sommet S $\quad z=\frac{a}{R}\left[R+\frac{l}{2}+\varphi\frac{h-\frac{l}{2}\frac{a}{R}}{1+\varphi\frac{a}{R}}\right] \qquad y=\frac{l}{2}+\varphi\frac{h-\frac{l}{2}\frac{a}{R}}{1+\varphi\frac{a}{R}}$

Négligeons $\varphi\frac{a}{R}$ et φ^2, puis φh devant $R+\frac{l}{2}$

$$\text{Tang}\ \psi_s=-\frac{R^2}{R^2+a^2}\left(\varphi-\frac{a}{R}\right)$$

Pas de porte-à-faux pour $\varphi\geqslant\frac{a}{R}$, même règle que pour les voûtes en berceau.

aux naissances $\quad z=0 \qquad y=\left[R+\frac{l}{2}+(a+h)\varphi\right]\frac{R}{\sqrt{R^2+a^2}}-R$

Négligeons les termes en φ^2

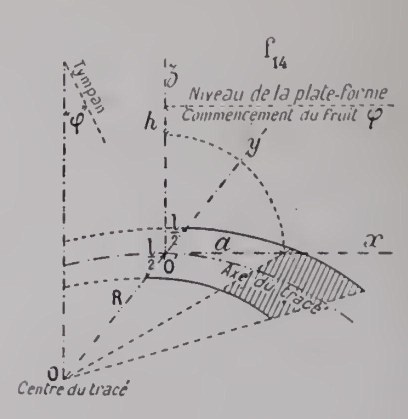
$$\text{Tang}\ \psi_n=-\varphi\frac{R}{\sqrt{R^2+a^2}}$$

Art. 3. — Douelle en conoïde

On peut aussi dresser l'intrados suivant un conoïde à génératrices horizontales ayant pour directrices (f_{14}) :

la verticale du centre du tracé ;

le cercle de rayon a situé dans le plan vertical tangent à l'axe du tracé au milieu de l'ouverture de la voûte et ayant son centre au point O', dans le plan des naissances.



On trouve pour l'équation (axes $O'x$, $O'y$, $O'z$) :

du conoïde $$(R+y)^2\ (a^2-z^2)=R^2x^2$$

de la surface du tympan convexe (comme à l'art. 2 ci-dessus)

$$x^2+(R+y)^2=\left[R+\frac{l}{2}+(a+h-z)\varphi\right]^2$$

de la projection de leur intersection sur le plan $yO'z$

$$(R+y)^2\left[1+\frac{a^2-z^2}{R^2}\right]=\left[R+\frac{l}{2}+(a+h-z)\varphi\right]^2$$

L'inclinaison de cette courbe sur la verticale est :

$$\text{Tang}\ \psi=\pm\frac{R\left[R+\frac{l}{2}+(a+h)\varphi\right]}{(R^2+a^2-z^2)^{\frac{3}{2}}}\left[z-\varphi\frac{R^2+a^2}{R+\frac{l}{2}+(a+h)\varphi}\right]$$

ou, négligeant $(a+h)\varphi$ devant $R+\frac{l}{2}$, $$=\pm\frac{R\left(R+\frac{l}{2}\right)}{(R+a^2-z^2)^{\frac{3}{2}}}\left(z-\varphi\frac{R^2+a^2}{R+\frac{l}{2}}\right)$$

z varie de O à a. Pour que Tang ψ ne change pas de signe entre ces 2 limites, il faut :

$$a\leqslant\varphi\frac{R^2+a^2}{R+\frac{l}{2}}\qquad\qquad\varphi\geqslant a\frac{R+\frac{l}{2}}{R^2+a^2}$$

au sommet $z=a$ $$\text{Tang}\ \psi_s=\frac{R^2+a^2}{R^2}\left[a\frac{R+\frac{l}{2}}{R^2+a^2}-\varphi\right]$$

aux naissances $z=o$ $$\text{Tang}\ \psi_N=\frac{R}{\sqrt{R^2+a^2}}\varphi$$ (comme pour la douelle conique)

Pas de changement de signe pour $\varphi\geqslant a\frac{R+\frac{l}{2}}{R^2+a^2}$, soit pratiquement $\geqslant\frac{a}{R}$

Art. 4. — Sujétions d'exécution.

Les courbes de tête d'amont et d'aval ont des longueurs peu différentes, sauf pour les très grandes ouvertures.

Il n'y aura pas à prévoir d'appareil spécial : les moellons de douelle auront tous la même épaisseur : on fera converger les assises en variant, d'ailleurs de très peu, l'épaisseur des joints[6].

6. — Pour une voûte de 25m, en courbe de 250m, avec 195 assises de 0m20 environ d'épaisseur, l'épaisseur des joints ne devrait varier, d'une tête à l'autre, que de 4mm.

Toutes les fermes du cintre seront taillées comme la ferme de la tête concave qui est la plus petite : on augmentera, à la demande, leur développement en clouant des fourrures sur les vaux.

Il n'est pas plus difficile d'exécuter une voûte en cône ou en conoïde qu'en berceau :

Le cône et le conoïde diffèrent très peu, surtout pour les viaducs à une voie.

Art. 5. — Fruit des piles.

On adoptera des fruits droits constants ou des fruits paraboliques, d'après la hauteur totale de l'ouvrage, comme il est spécifié p. 64.

Du côté convexe, comme le fruit des piles doit être au moins égal à celui des tympans, il sera généralement plus grand qu'en alignement droit : c'est d'ailleurs justifié pour résister à la force centrifuge.

Du côté concave, on pourra le réduire un peu. Il n'est pas indispensable d'avoir les mêmes fruits sur les deux élévations. Sans doute, on peut voir en même temps deux arêtes amont et aval d'une pile ; c'est un très léger inconvénient d'aspect pour les viaducs à une voie ; mais de très beaux ouvrages sont ainsi.

Art. 6. — Le viaduc est en courbes de rayons différents, ou en raccordement parabolique.

On adoptera pour les tympans, tout le long du viaduc, le même fruit, celui qui correspond au plus petit rayon.

CHAPITRE III

POSITION DES GARDE-CORPS

Art. 1. — Tracé des garde-corps.

Quel que soit le tracé des tympans (polygonaux ou courbes), les garde-corps seront toujours posés verticaux ; sauf dans le raccordement parabolique côté concave, ils seront parallèles à l'axe du tracé.

Art. 2. — Surécartement du côté concave.

En alignement droit, il y a 0^m655 entre le gabarit et la face intérieure du garde-corps (f_{15}).

Sur une voie en dévers D, le gabarit s'incline du côté concave de $\text{tang}\,\theta = \frac{D}{1^m51}$ ou, à très peu près $= 2/3$ D.

L'espace libre au niveau du sommet du garde-corps, à h au-dessus du rail bas est réduit de : $m = \frac{2hD}{3}$

Les garde-corps ont, au plus, 1^m de hauteur : le dessus de la plinthe est à 0^m10 en contrebas du rail voisin : $h = 0^m90$

D'où : $m = \frac{2 \times 0^m90 \times D}{3} = \frac{3\,D}{5}$

Le garde-corps sera donc écarté du côté concave de 3/5 D ou, comme $D \leqslant 0^m16$, au plus de 0^m096.

Art. 3. — Parties en courbes de rayons différents ou en raccordement parabolique.

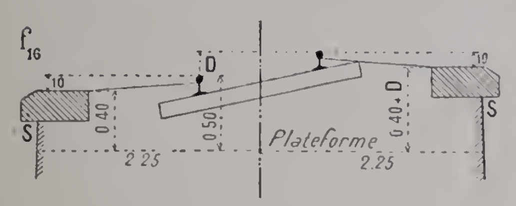
En tous points, la distance du garde-corps à l'axe de la voie sera : $2^m255 + \frac{3}{5}$ D.

En alignement comme en courbe, la distance du garde-corps à la face verticale vue de la plinthe est constante.

PLINTHES

Art. 1. — Niveau. (f_{16}).

La plinthe du côté concave sera, comme en alignement, à 0m10 en contre-bas du rail voisin, soit à 0m40 au-dessus de la plate-forme ; la plinthe du côté convexe sera à 0m40 + D au-dessus de la plate-forme.

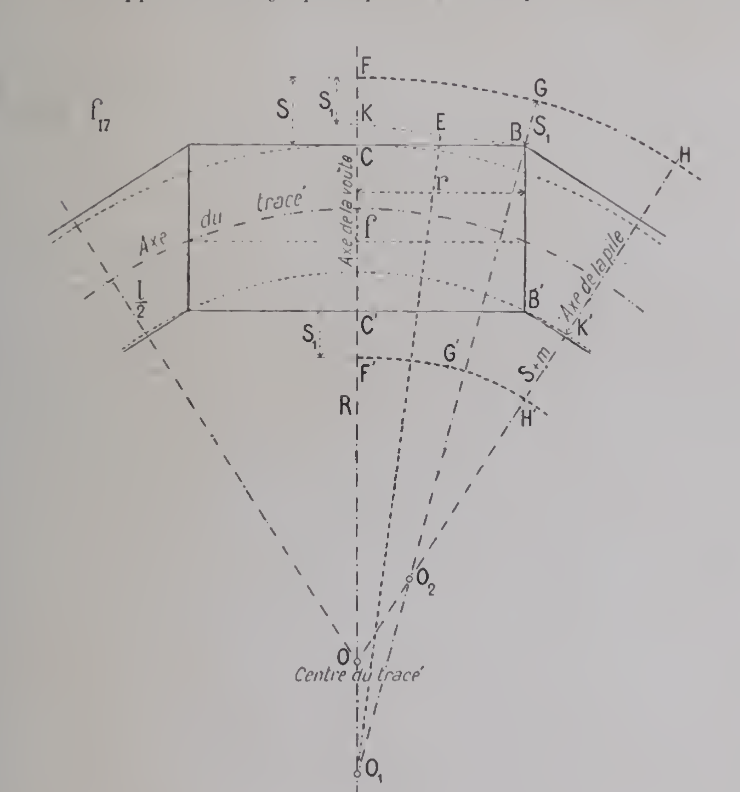


Art. 2. — Tracé en plan.

A. — Règle commune aux deux têtes. — Les deux plinthes seront posées en courbe, sans brisures.

B. — Côté concave. — Pour suivre le garde-corps, la plinthe sera déplacée vers le centre de la courbe et son porte-à-faux augmenté de $\frac{3}{5}$D (p. 94). On augmentera sa queue pour qu'elle reste stable, mais non la distance du tympan à l'axe.

Supposons les tympans plans sur chaque arche et sur chaque pile (tympans à facettes p. 86)



Soient (f_{17}) :

S la saillie en alignement droit, CF ;

S_1 la saillie minima à admettre, BG (0m20) ;

m la surlargeur due au dévers, $\frac{3\,D}{5}$;

$f = \frac{r^2}{2\,R}$ la flèche du tracé sur la portée $2r$.

Le rayon de la plinthe sera :

$R - \frac{l}{2} - S - m$, si $S + m \geqslant f + S_1$ (ou $f \leqslant S - S_1 + m$).

Si $f > S - S_1 + m$,

on prend $C'F' = S_1$

$K'H' = S + m$.

On construit 2 arcs de cercle F'G', G'H' tangents entre eux, l'un passant par F' et ayant son centre sur OK, l'autre passant par H' et ayant son centre sur OH.

C. — Côté convexe. — Le rayon de la plinthe sera $R + \frac{l}{2} + S$, si $S \geqslant f + S_1$ ou $f \leqslant S - S_1$.

Si $f > S - S_1$, on prend $CK = S - S_1$; au milieu de BK, on élève la perpendiculaire EO_1.

De O_1 comme centre, avec le rayon $O_1K + S_1$, on décrit l'axe FG.

De O_2 (rencontre de O_1G avec l'axe de la pile) comme centre, on décrit l'arc GH tangent en G à GF.

TITRE III

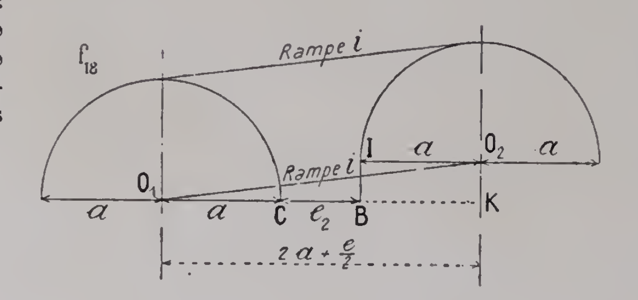
DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VIADUCS EN RAMPE

§ I. — *INTRADOS*

Art. 1. — *1er système.* **Chaque voûte est décrite avec un rayon unique, comme en palier : les naissances, de part et d'autre d'une pile, sont à des niveaux différents (f_{18}).**

Les centres sont sur une parallèle aux rails en rampe i.

Au-dessus de l'horizontale BC de la naissance C de la voûte la plus basse, on prend un élément droit : $IB = O_2K = (2a + e_2)\, i$.

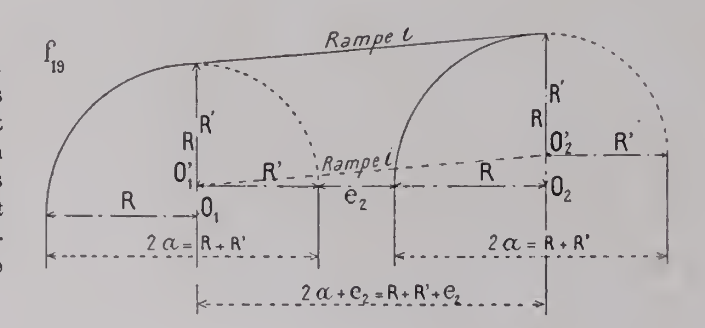


Ce petit élément ne se voit pas, si on ne met pas de cordon aux naissances, — et, pour l'aspect, il convient précisément de n'en point mettre.

A l'origine des chemins de fer, c'était le seul système appliqué, — c'est toujours le meilleur, — sauf sous très forte rampe.

J'admets, — un peu arbitrairement, — qu'on en limite l'application à 30^{mm}.

Art. 2. — *2e système.* **Les deux moitiés d'une voûte sont décrites avec un rayon différent : les naissances, de part et d'autre d'une pile, sont au même niveau (f_{19}).** [8]



$$\left\{ \begin{aligned} R + R' &= 2a \\ R - R' &= (2a + e_2)\, i \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} R &= a + i\left(a + \frac{e_2}{2}\right) \\ R' &= a - i\left(a + \frac{e_2}{2}\right) \end{aligned} \right.$$ [9]

Le sommet de la voûte n'est pas au milieu, — les deux 1/2 voûtes et leurs cintres ne sont pas symétriques, — on ne peut pas retourner les fermes des cintres.

8. — V, p. 81.

9. — Exemple : Viaduc de la Crueize (Ligne de Marvejols à Neussargues) :

$2a = 25^m$ $\quad e_2 = 5^m20$ $\quad i = 0^m0275$ $\quad \left(a + \frac{e_2}{2}\right) i = 0^m415$

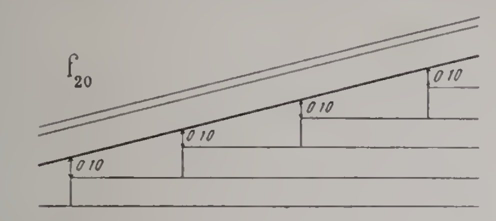
$R = 12^m915$ $\quad R' = 12^m085$ $\quad R - R' = 0^m830.$

Il y a donc un peu plus de sujétion dans la taille, l'assemblage et le « remploi » des cintres.

Il a été et est encore fort employé.[10, 11]

§ 2. — *TYMPANS ET CULÉES EN MOELLONS ASSISÉS*

Dans les viaducs en rampe, les assises des tympans, si elles sont horizontales, rencontrent le dessous de la plinthe sous un angle très aigu.



Souvent, on s'est borné à recouper les becs de flûte par les moellons de l'assise inférieure (f_{20}).

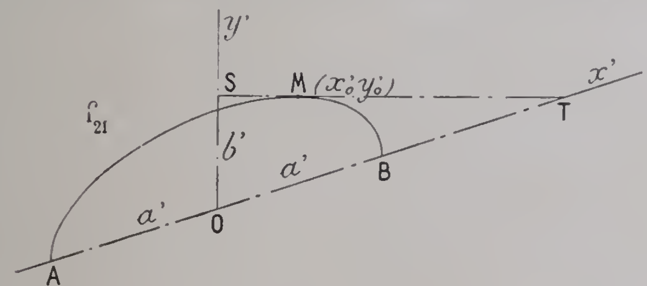
Mais il vaut mieux, incliner progressivement les assises à partir des naissances, de telle sorte que l'assise sous la plinthe ait la même pente[12].

10. — Grands viaducs des lignes de Limoges à Brive par Pompadour, — de Séverac à Neussargues....

11. — Si la rampe est très forte (chemin de fer à crémaillère, funiculaire), on peut prendre pour l'intrados une ellipse ayant comme diamètres conjugués la ligne des naissances et une verticale (f_{21}) (Tome V, p. 82) ; son équation est :

$$\frac{x'^2}{a'^2} + \frac{y'^2}{b'^2} = 1$$

MT, tang en M (x_0' y_0') $\begin{cases} OT = \dfrac{a'^2}{x_0'} \\ OS = \dfrac{b'^2}{y_0'} \end{cases}$



12. — Viaduc de Pompadour (Brive-Limoges) 1873-75.

TITRE IV

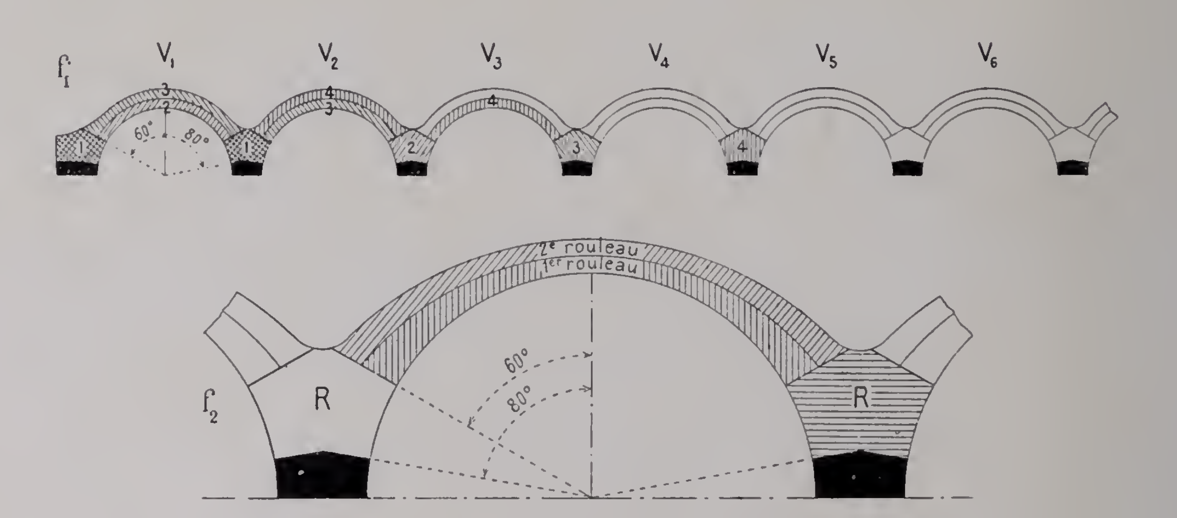
VIADUC A UN GRAND NOMBRE D'ARCHES
NOMBRE DE CINTRES[1]
EXÉCUTION DES VOÛTES « EN CASCADE »

Pour tracer ces quelques schémas d'exécution, on a dû faire force hypothèses : ce ne sont que de simples indications.

Art. 1. — Avec 5 cintres.

Avant de commencer la voûte V_1, on « lève » les cintres de V_1, V_2, V_3, (f_1), — puis, à temps, ceux de V_4 et V_5.

J'admets qu'il faille le même temps pour exécuter : la retombée R (f_2) entre 60° et 80°, le 1er rouleau, le 2e.



Il y a trois équipes de maçons, M_1, M_2, M_3. Dans le même temps, M_3 fait le 2e rouleau de la voûte n (par ex. V_2), M_2 le 1er de la voûte $n+1$ (V_3), M_1 la retombée commune aux deux voûtes $n+2$, $n+3$ (V_4, V_5).

Le jour du décintrement de la voûte n (par ex. V_2), le 2e rouleau de la voûte $n+1$ (V_3) et le 1er de $n+2$ (V_4) sont en cours : la retombée de V_{n+2} et V_{n+3} (V_4, V_5) est achevée, celle de V_{n+3}, V_{n+4} (V_5, V_6) en cours.

Soit t_C le temps nécessaire pour « déposer » et « lever » un cintre.

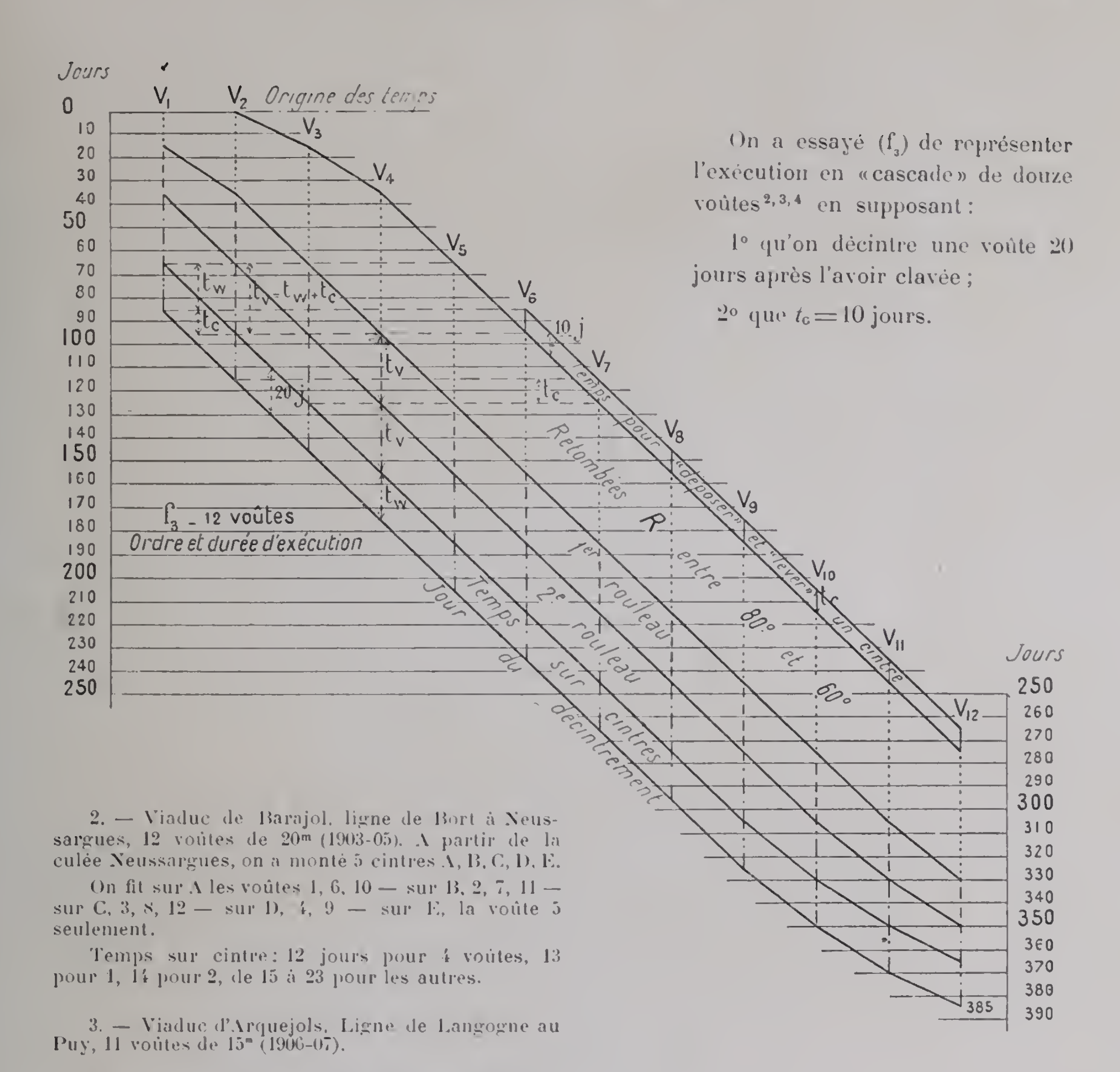
t_C après le décintrement de la voûte n (V_2), son cintre est prêt pour V_{n+5} (V_7) : le 2e rouleau de V_{n+1} (V_3) et le 1er de V_{n+2} (V_4) sont clavés : les retombées de V_{n+2}, V_{n+3} (V_4, V_5) et V_{n+3}, V_{n+4} (V_5, V_6) achevées.

1. — V. p. 156, 157.

On a essayé (f_3) de représenter l'exécution en « cascade » de douze voûtes[2,3,4] en supposant :

1° qu'on décintre une voûte 20 jours après l'avoir clavée ;

2° que $t_c = 10$ jours.



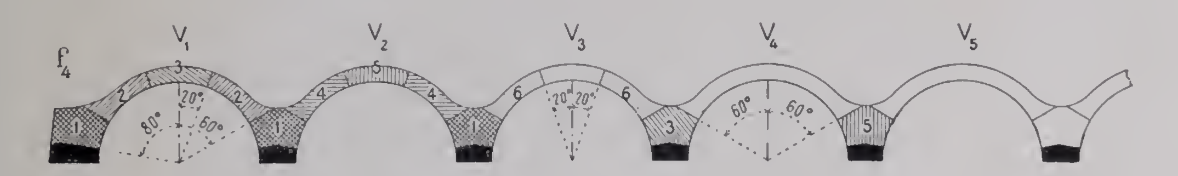
2. — Viaduc de Barajol, ligne de Bort à Neussargues, 12 voûtes de 20m (1903-05). A partir de la culée Neussargues, on a monté 5 cintres A, B, C, D, E.

On fit sur A les voûtes 1, 6, 10 — sur B, 2, 7, 11 — sur C, 3, 8, 12 — sur D, 4, 9 — sur E, la voûte 5 seulement.

Temps sur cintre : 12 jours pour 4 voûtes, 13 pour 1, 14 pour 2, de 15 à 23 pour les autres.

3. — Viaduc d'Arquejols. Ligne de Langogne au Puy, 11 voûtes de 15m (1906-07).

4. — Au viaduc de Mussy (Paray-le-Monial à Givors — 1892-95), les 18 voûtes de 25m ont été faites sur 5 cintres, mais à pleine épaisseur (f_4).



Quand on décintrait une voûte V_n (V_1), V_{n+1} (V_2) était clavée — les maçonneries étaient élevées :

pour V_{n+2} (V_3), à 20° de la clef, de chaque côté ;

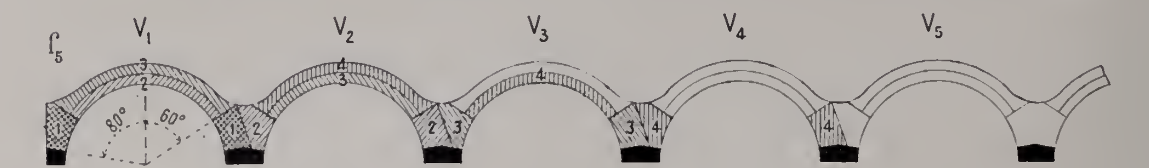
pour V_{n+3} (V_4), à 60° de la clef, de chaque côté ;

pour V_{n+4} (V_5), à 60° de la clef, mais à gauche seulement.

Art. 2. — Avec 4 cintres.

On est moins à l'aise. Il faut accepter quelque inconvénient.
On peut choisir deux ordres d'exécution :

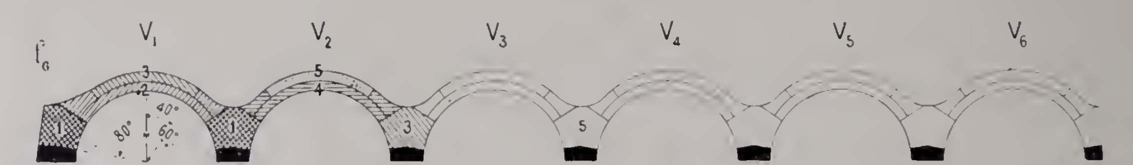
A. — On accepte de faire en deux fois le massif de retombée commun à deux voûtes (f_5).[5]



L'ordre d'exécution est le suivant :

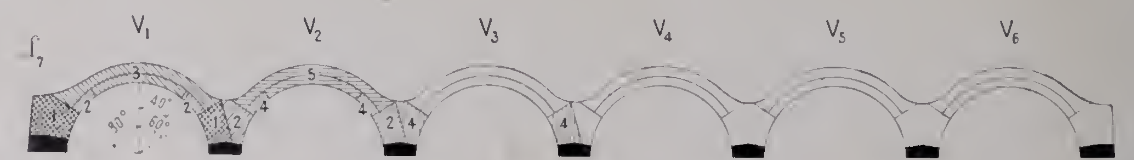
Voûte n°	Etat d'avancement simultané de 4 voûtes se suivant :		
n	1er rouleau clavé	2e rouleau clavé	décintrée
$n+1$	Retombées montées à 60° de la clef	1er rouleau clavé	2e rouleau clavé
$n+2$	»	Retombées montées à 60° de la clef	1er rouleau clavé
$n+3$	»	»	Retombées montées à 60° de la clef.

B. — Ou bien on accepte de claver une voûte n avant d'avoir construit le 1er rouleau de la voûte $n+1$ (f_6)[6].



Art. 3. — Avec 3 cintres.

Il faut accepter à la fois ces deux inconvénients : de faire en deux parties la retombée commune à deux voûtes, de claver une voûte n avant d'avoir construit le 1er rouleau de $n+1$ (f_7)[7].



Art. 4. — Avec 6 cintres.

On emploie six cintres,[8] et plus,[9] quand on veut aller vite.

5. — Viaduc de la Gascarie — Ligne de Carmaux à Rodez, 12 voûtes de 20m (1894-97) ;
Viaduc du Plô — Ligne d'Espalion à Bertholène, 7 voûtes de 17m (1903-04) ;
Viaduc de l'Oued Beja (Tunisie), 4 cintres pour 12 voûtes de 21m (1908-10).

6. — Viaduc de Morez — Ligne de Morez à Saint-Claude, 9 voûtes de 20m (1909-12).

7. — Viaduc de la Bargeasse — Ligne de Langogne au Puy, 6 voûtes de 10m (1906).

8. — Viaduc de Saint-Florent — Ligne d'Issoudun à Saint-Florent, 14 voûtes de 30m (1889-92) ;
Viaduc de l'Auzon — Ligne d'Argenton à La Châtre, 20 voûtes de 20m (1896-1900).

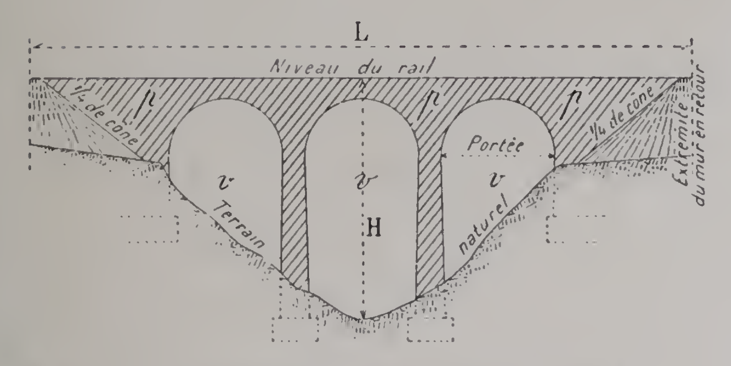
9. — Viaduc de la Bassera — Ligne de Nice à Coni, 7 voûtes de 12m, 7 cintres (1913-14).

TITRE V

CUBES ET DÉPENSES

CHAPITRE I

UNITÉS ADOPTÉES



Soient :

S_e — la surface vue d'élévation entre le rail, les 1/4 de cône et le terrain [1, 2] ;

p — la surface du plein en élévation ;

v — celle du vide,

$$p+v=S_e\ ;$$

Q — le cube de maçonnerie à mortier du viaduc ;

D — sa dépense.

$Q : S_e$ — est le cube par mq d'élévation (vides et pleins ensemble) ;

$D : S_e$ [3] — est la dépense par mq d'élévation.

1. — Pour une première approximation grossière d'avant-projet, on peut admettre que S_e est 0,6 L H (c'est-à-dire plus grande que le triangle 1/2 L H, plus petite que la parabole $\frac{2}{3}$ L H).

2. — Pour les ouvrages étudiés aux Tomes I à IV, — en général ouvrages bas, sous route ou sous rail, c'est-à-dire de largeurs entre parapets très variables, — on a rapporté les quantités et dépenses :
1° à la surface offerte à la circulation S_p = L × (Largeur entre parapets), — surface utile ;
2° au volume W = S_e × (Largeur entre parapets), — volume « utile ». (Avertissement en tête des Tomes I à IV).
Pour les viaducs sous chemin de fer, ouvrages hauts, de largeur entre parapets à peu près fixe (4^m50 pour une voie, 8^m pour deux voies), il est plus pratique de rapporter à S_e les quantités et dépenses.

3. — $D : S_e$ varie beaucoup suivant les lieux, les dates, la difficulté des fondations.
On a proposé pour $D : S_e$:
Viaducs à une voie : $60^f + 0{,}8$ H ;
Viaducs à deux voies : 80^f + H.
Mais il y a de très grands écarts par rapport à ces moyennes.

CUBES ET DÉPENSES PAR UNITÉ

§ 1. — *VIADUCS A DEUX VOIES*

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v — à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide v — au plein $\frac{v}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonn^ie^ $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonn^ie^ $\frac{D}{Q}$
Nantes à Brest 1859 à 1866		m	m		m			mc	f	f
	l'Aulne	54.00	357.00	12	22.00	0.68	2.13	3.46	154.00	44.00
	Pont-de-Buis	41.60	222.00	9	18.00	0.64	1.90	3.67	154.00	42.00
	Daoulas	38.10	357.00	15	18.00	0.57	2.04	3.51	135.00	38.00
	Quimperlé	31.35	156.60	7	15.00	0.62	1.64	3.46	134.00	39.00
	Auray	29.00	206.00	10	15.00	0.64	1.74	3.88	152.00	39.00
	Hennebont	27.37	222.00	5 6	22.00 10.00	0.64	1.80	3.63	197.00	54.00
	Châteaulin	24.20	117.00	7	12.00	0.61	1.58	3.63	112.00	31.00
	Moyennes	......	......	......	......	0.63	1.70	$3^{mc}42$	$143^{f}.20$	$41^{f}.90$
Marvejols à Neussargues 1879 à 1888		m	m		m			mc	f	f
	Crueize	63.30	218.78	6	25.00	0.68	2.15	3.78	176.70	46.70
	Sénouard	43.00	231.10	9	18.00	0.67	2.05	4.33	166.70	38.50
	Chanteperdrix	42.00	238.34	9	20.00	0.67	2.00	3.91	173.00	44.20
	Merdaric	22.90	86.76	2	20.00	0.53	1.14	5.84	224.90	38.50
	Lignon	19.90	129.58	10	10.00	0.61	1.54	3.22	136.20	42.30
	Maison-Rouge	15.30	77.74	4 1	8.00 15.00	0.54	1.17	5.45	213.00	39.20
	Chapchiniès	13.17	51.25	4	8.00	0.58	1.38	5.02	170.80	34.10
	Moyennes	......	......	......	......	0.66	1.93	$4^{mc}09$	$173^{f}.60$	$42^{f}.40$
Cahors à Brive 1881 à 1889		m	m		m			mc	f	f
	Boutet	37.00	476.00	26	15.00	0.71	2.50	3.52	142.00	40.00
	Souillac	32.47	571.13	30	15.00	0.71	2.50	3.48	129.00	37.10
	Sorbier	28.30	113.72	9	10.00	0.70	2.38	2.80	94.00	33.60
	Lamothe	25.90	313.95	15	15.00	0.63	1.70	4.67	141.00	30.20
	Planche-Torte	23.00	184.00	15	10.00	0.70	2.33	3.71	127.00	34.20
	Lignyroux	21.75	101.60	8	10.00	0.67	2.00	4.22	137.00	32.50
	Marjaudes	21.70	227.60	14	10.00	0.74	2.80	2.94	109.00	37.10
	Présignac	21.70	150.00	12	10.00	0.66	1.93	3.50	126.00	35.90
	Calamane	21.30	308.00	25	10.00	0.72	2.53	3.95	112.00	28.20
	Saint-Denis	20.00	81.22	7	8.00	0.68	2.08	7.46	196.00	26.30
	Lamouroux	19.50	118.00	9	10.00	0.67	2.00	6.01	175.00	29.00
	Moyennes	......	......	......	......	0.70	2.29	$3^{mc}83$	$132^{f}.50$	$34^{f}.60$
Limoges à Brive par Uzerche 1886 à 1892		m	m		m			mc	f	f
	Saint-Germain-les-Belles	48.38	300.00	14	17.00	0.60	1.53	4.30	109.70	26.50
	Vigen	44.60	210.00	10	16.00	0.66	1.97	3.92	114.70	29.30
	Pierre-Buffière	42.00	211.00	11	15.00	0.67	2.07	3.65	121.80	33.30
	la Pélisserie	32.60	114.00	7	12.00	0.65	1.87	3.34	105.80	31.60
	Limoges	31.50	423.40	23	15.00	0.69	2.22	2.98	100.10	33.70
	Clan	25.14	168.80	13	10.00	0.65	1.87	2.91	102.60	35.20
	la Rozelle	16.70	73.20	5	10.00	0.58	1.39	4.29	126.30	29.40
	Moyennes	......	......	......	......	0.66	1.88	$3^{mc}61$	$110^{f}.30$	$30^{f}.50$

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v — à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide v — au plein $\frac{v}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonn^{ie} $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonn^{ie} $\frac{D}{Q}$
Argenteuil à Mantes 1888 à 1892		m	m		m			mc	f	f
	Sur le grand ravin de La Frette.	22.40	96.00	7	10.00	0.66	1.91	3. 68	132.10	35.90
	Maurecourt	15.31	52.57	3	11.00	0.52	1.06	4. 43	134.50	30.40
	la Montcient	13.39	48.60	3	11.50	0.56	1.25	6. 48	299.10	46.10
	Sur le petit ravin de La Frette.	11.77	33.30	3	7.00	0.51	1.05	3. 87	112.60	31.20
	Bas-Vals	11.43	85.80	3	20.00	0.47	0.88	4. 65	226.30	48.70
	Triel	8.63	72.15	6 1 1	5.10 8.00 9.00	0.50	1.01	6. 57	216.70	33.00
	Moyennes					0.56	1.28	4^{mc}63	178^{f}.30	38^{f}.50
Bourges à Cosne 1889 à 1893		m	m		m			mc	f	f
	Saint-Satur	27.80	428.65	26	13.00	0.66	1.98	4. 38	117.50	26.90
	Ménétréol	19.30	190.20	15	10.00	0.65	1.82	4. 05	119.50	29.50
	Thauvenay	15.26	45.83	3	10.00	0.61	1.56	10. 30	241.70	23.50
	Moultonneaux	15.54	38.48	3	8.50	0.62	1.60	7. 00	152.20	21.70
	Moyennes					0.66	1.91	4^{mc}57	123^{f}.10	26^{f}.90
Issoudun à Saint-Florent 1889 à 1893		m	m		m			mc	f	f
	Saint-Florent	21.60	524.46	14	30.00	0.73	2.75	3. 05	121.00	39.70
Paray-le-Monial à Lamure 1892 à 1899		m	m		m			mc	f	f
	Mussy	59.76	561.00	18	25.00	0.68	2.15	4. 03	128.60	31.90
	Villon	31.50	155.00	8	15.00	0.64	1.81	3. 20	77.90	24.30
	la Boucle	29.00	130.00	4 2	12.00 20.00	0.53	1.14	4. 13	105.40	25.50
	Chez Aulas	26.65	128.00	8	12.00	0.63	1.73	3. 37	94.00	27.90
	la Foraize	25.00	119.00	6	15.00	0.57	1.33	3. 51	95.40	27.20
	Collier	24.60	121.00	7	12.00	0.62	1.61	3. 58	100.00	28.00
	Montveneur	24.50	127.00	6	15.00	0.59	1.43	3. 55	88.10	24.80
	la Grange-Neuve	20.00	109.00	5	15.00	0.58	1.39	3. 99	108.60	27.30
	Moyennes					0.65	1.85	3^{mc}85	114^{f}.60	27^{f}.80

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima **H**	Longueur **L**	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v — à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide v — au plein $\frac{v}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonnerie $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonnerie $\frac{D}{Q}$
		m	m		m			mc	f	f
Miramas à L'Estaque 1910 à 1914	l'Étable	38.89	90.74	1 2	25.00 15.00	0.44	0.79	3. 71	150.27	40.53
	Aragnols	37.54	112.00	3	20.00	0.57	1.32	3. 72	155.85	41.88
	Jonquier	37.00	137.60	1 4	30.00 15.00	0.61	1.53	3. 28	161.77	49.25
	la Vesse	35.38	168.00	6	20.00	0.64	1.79	2. 48	192.50	79.73
	Méjean	34.50	122.40	5	15.00	0.61	1.55	3. 30	142.43	43.12
	Riaux	33.00	178.90	8	15.00	0.48	0.92	3. 83	151.74	39.61
	Mauvallon	31.40	154.50	6	15.00	0.54	1.20	3. 07	136.45	44.42
	Loubatons	30.83	182.30	7	15.00	0.51	1.05	3. 09	131.58	42.58
	la Baume de Lume	27.90	61.10	3	13.00	0.54	1.19	2. 33	118.04	50.73
	l'Aigle	27.60	107.50	4	15.00	0.50	1.01	4. 28	224.66	52.52
	la Corbière	27.18	226.62	6 7	6.50 20.00	0.57	1.30	3. 21	128.62	40.13
	Verdon	26.40	115.00	6	15.00	0.64	1.76	2. 84	114.44	42.62
	Grand Vallat	20.30	151.00	8	15.00	0.62	1.60	3. 52	205.53	58.41
	la Réraille	19.60	99.00	5	15.00	0.59	1.43	3. 25	162.99	50.13
	Vauclair	11.50	64.50	5	8.00	0.38	0.60	2. 75	137.84	50.17
	Piche	11.00	53.00	5	8.00	0.23	0.29	4. 46	243.00	54.40
	Moyennes	......	....	......	....	0.56	1.27	3mc24	155f.40	48f.02
Moyennes générales sur 67 viaducs ayant ensemble 267.100mq de surface d'élévation totale, 983.396mc de maçonnerie à mortier, ayant coûté 36.274.984 fr.						0.65	1.82	3. 68 mc	135.81 f	36.89 f

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide r à la surface totale $\frac{r}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide r au plein $\frac{r}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonnie $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonnie $\frac{D}{Q}$
		m	m		m			mc	f	f
Limoges à Brive 1873 à 1875	Pompadour	55.00	285.00	8	25.00	0.65	2.08	2. 25	146.00	65.00
	la Sagne	36.40	157.50	5	20.00	0.65	1.88	1. 70	99.00	59.00
	la Boucheuse	28.60	178.00	7	20.00	0.67	2.04	2. 02	92.00	45.00
	la Donne	26.00	130.00	5	20.00	0.63	1.67	2. 20	101.00	46.00
	la Loue	24.70	135.80	5	18.00	0.63	1.69	2. 30	99.00	43.00
	Sarget	24.45	143.00	5	20.00	0.61	1.57	2. 81	136.00	48.00
	Vignols	21.00	252.00	10	20.00	0.58	1.39	2. 36	131.00	55.00
	l'Isle	16.60	51.00	3	12.00	0.55	1.22	2. 57	111.00	43.00
	Combes	13.50	54.60	1 2	16.00 10.00	0.56	1.25	1. 65	124.00	76.00
	la Pouge	13.30	84.00	3	20.00	0.51	1.02	2. 16	105.00	49.00
	la Meyze	12.00	75.20	3	18.00	0·51	1.04	3. 31	131.00	40.00
	Haute-Vézère	12.00	42.00	3	10.00	0.52	1.08	3. 25	145.00	44.00
	Monteil	12.00	83.00	7	8.00	0.52	1.09	2. 09	132.00	63.00
	la Croix	10.70	63.90	5	8.00	0.48	0.92	2. 06	129.00	63.00
	Boulou	10.00	37.60	1 2	9.00 8.00	0.50	1.00	3. 27	136.00	42.00
	Moyennes	....	....	......	....	0.62	1.66	2mc26	120f.80	53f.40
		m	m		m			mc	f	f
La Flèche à La Suze et à Sablé 1875 à 1877	Sablé	21.50	285.00	11	20.00	0.61	1.59	2. 18	104.00	47.80
		m	m		m			mc	f	f
Marvejols à Neussargues 1879 à 1888	Blaud	21.60	114.00	8	10.00	0.65	1.89	2. 60	87.50	33.70
	Rimeize	18.70	129.35	10	10.00	0.64	1.80	2. 92	93.80	32.10
	Varillette	17.00	134.30	10	10.00	0.64	1.76	2. 33	97.80	41.90
	Massalès	16.50	90.20	5	12.00	0.63	1.68	2. 95	89.00	30.20
	Saillant	16.50	51.30	3	10.00	0.57	1.35	2. 83	114.30	40.40
	la Combe	13.80	47.20	3	10.00	0.60	1.53	3. 35	126.20	37.70
	Triboulin	10.80	56.31	5	10.00	0.56	1.31	3. 26	168.60	51.70
	Malagazanne	6.90	34.20	2 1	4.00 12.00	0.45	0.89	3. 64	167.70	46.10
	Moyennes	....	....	......	....	0.63	1.67	2mc79	101f.90	36f.50
		m	m		m			mc	f	f
Saint-Denis au Buisson 1880 à 1884	Bramefond	44.14	321.65	14	17.00	0.68	2.14	2. 29	75.30	32.80
	Courtils	35.00	141.80	7	15.00	0.66	1.94	2. 60	104.80	40.20
	Moyennes	....	....	......	....	0.68	2.10	2mc36	81f.60	34f.60

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide r — à la surface totale $\frac{r}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide r — au plein $\frac{r}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonnerie $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonnerie $\frac{D}{Q}$
Tournon au Blanc 1880 à 1885		m	m		m			mc	f	f
	l'Isle-Jourdain	38.60	304.00	12	20.00	0.71	2.41	2. 01	97.00	48.00
	Blanc	38.11	528.00	21	20.00	0.70	2.32	2. 80	142.00	51.00
	la Villerie	24.26	113.60	5	15.00	0.64	1.75	2. 63	106.00	40.50
	la Charente	24.00	140.00	6	16.00	0.64	1.77	2. 66	103.00	38.80
	la Caronnière	18.28	92.00	7	10.00	0.68	2.13	2. 28	101.00	44.20
	la Faye	15.90	55.00	5	8.00	0.64	1.82	3. 64	141.00	38.80
	Tersac	14.60	41.60	3	10.00	0.61	1.56	3. 10	167.00	53.70
	Chez-Dinette	14.50	74.20	7	8.00	0.66	1.95	4. 63	163.00	35.30
	Bourbes	14.30	55.00	5	8.00	0.61	1.55	2. 70	128.00	47.40
	Salleron	12.69	47.50	1 2	14.00 10.00	0.56	1.15	5. 13	239.00	46.50
	Grand-Vicq	11.55	51.00	1 1 1	9.89 10.11 16.00	0.56	1.27	3. 98	205.00	51.60
	Moyennes	......	......	......	......	0.69	2.17	$2^{mc}64$	$126^{f}.00$	$47^{f}.70$
Aurillac à Saint-Denis 1883 à 1884		m	m		m			mc	f	f
	l'Authre	34.14	118.35	5	16.00	0.68	2.15	2. 07	85.00	41.00
	la Cère	24.89	123.35	7	12.00	0.67	2.02	1. 83	92.00	50.00
	l'Auze	23.92	108.75	6	12.00	0.67	2.07	1. 89	73.00	38.00
	Moyennes	......	......	......	......	0.68	2.08	$1^{mc}94$	$83^{f}.80$	$43^{f}.20$
Carmaux à Rodez 1894 à 1897		m	m		m			mc	f	f
	la Gascarie	49.00	296.30	12	20.00	0.68	2.15	2. 04	61.90	30.40
Argenton à La Châtre 1897 à 1901		m	m		m			mc	f	f
	l'Auzon	42.70	499.00	20	20.00	0.70	2.30	3. 79	122.50	32.30
Guéret à La Châtre 1901 à 1905		m	m		m			mc	f	f
	la Creuse	19.50	202.10	16	10.00	0.68	2.08	2. 35	94.50	40.30
	la Glane	19.40	152.20	12	10.00	0.69	2.20	2. 36	103.40	43.90
	la Petite Creuse	19.20	208.60	16	10.00	0.67	2.01	2. 61	124.00	47.50
	Moyennes	......	......	......	......	0.68	2.08	$2^{mc}45$	$107^{f}.70$	$44^{f}.00$

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima **H**	Longueur **L**	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide v au plein $\frac{v}{p}$	En élévation — Par mètre carré Cube de maçonnerie $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonnerie $\frac{D}{Q}$
Espalion à Bertholène 1903 à 1904		m	m		m			mc	f	f
	Plò	42.20	158.60	7	17.00	0.69	2.18	2. 13	85.60	40.20
	Labaume	36.00	114.00	6	14.00	0.68	2.10	1. 95	78.10	40.00
	Goudal	30.60	123.70	7	12.50	0.68	2.08	2. 11	79.10	37.40
	Conquettes	29.68	172.26	12	11.00	0.70	2.30	2. 08	73.70	35.50
	la Loubière	23.20	103.50	7	11.00	0.68	2.14	2. 07	83.80	40.40
	Moyennes	....	....	......	....	0.69	2.18	$2^{mc}08$	$79^{f}.70$	$38^{f}.30$
Bort à Neussargues 1901 à 1907		m	m		m			mc	f	f
	Barajol	56.41	317.00	12	20.00	0.69	2.22	3. 17	167.26	52.75
	Saint-Saturnin	36.30	205.70	10	15.00	0.70	2.36	3. 23	111.99	34.70
	Lugarde	25.90	153.21	12	10.00	0.68	2.11	3. 70	130.58	35.33
	Salsignac	24.30	189.41	14	10.00	0.62	1.65	1. 87	74.51	39.91
	Chassagny	22.24	97.54	6	12.00	0.60	1.47	3. 73	195.47	52.45
	Moyennes	....	....	......	....	0.68	2.08	$3^{mc}12$	$140^{f}.90$	$45^{f}.22$
Langogne au Puy 1905 à 1908		m	m		m			mc	f	f
	Arquejols	44.90	209.00	6	10.00	0.67	2.03	2. 14	74.84	35.02
	la Bargeasse	21.48	93.50	11	15.00	0.57	1.34	2. 96	87.26	29.43
	Moyennes	....	....	......	....	0.65	1.85	$2^{mc}31$	$77^{f}.37$	$33^{f}.55$
Morez à Saint-Claude 1908 à 1910		m	m		m			mc	f	f
	Saillard	46.40	97.68	1 4	25.00 12.00	0.63	1.67	2. 19	80.97	36.95
	Morez	40.68	238.05	9	20.00	0.68	2.12	2. 78	121.13	43.60
	Valfin	27.80	77.50	6	10.00	0.63	1.69	2. 97	125.40	42.22
	Crêt	15.75	34.90	5	5.00	0.51	1.03	3. 06	151.20	49.37
	Pain de Sucre	15.30	121.78	1 15	15.00 5.00	0.50	1.00	3. 01	132.66	44.13
	Puits	14.40	71.00	9	6.00	0.67	2.05	3. 06	128.20	41.96
	la Culée	12.12	22.20	3	5.00	0.58	1.36	3. 58	175.93	49.13
	Moyennes	....	....	......	....	0.64	1.77	$2^{mc}75$	$117^{f}.56$	$42^{f}.73$
Moyennes générales sur 61 viaducs ayant ensemble 184.446^{mq} de surface d'élévation totale, 481.402^{mc} de maçonnerie à mortier, ayant coûté 20.577.900 fr.						0.66	1.98	$2^{mc}61$	$111^{f}.57$	$42^{f}.75$

2e PARTIE

CALCULS ET ÉPURES

LIVRE I

COMMENT ON CALCULE UN CINTRE

LIVRE II

COMMENT ON CALCULE UNE VOÛTE

LIVRE I

COMMENT ON CALCULE UN CINTRE[1]

PONT ADOLPHE, A LUXEMBOURG[2]

CHAPITRE I

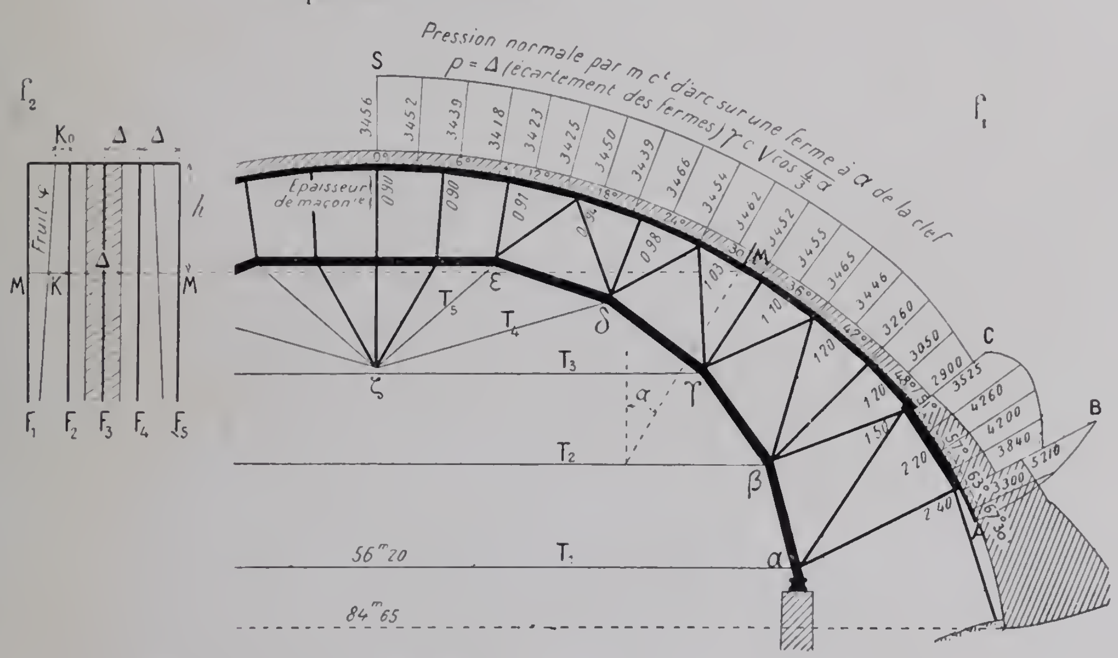
FERMES

§ 1. — *PRESSION NORMALE SUR LE CINTRE, A $\alpha°$ DE LA CLEF*

Par mètre carré, c'est :

$$p_\alpha = \gamma c \sqrt{\operatorname{Cos} \frac{4}{3}\alpha} \quad {}^{3,\ 4}$$

γ densité de la maçonnerie = 2.400^k
c épaisseur admise en M.

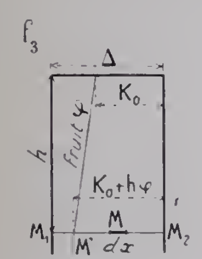


Soit Δ l'écartement des fermes (1m60).

La charge sur 1m de longueur de ferme en M, à α de la clef, est :

pour une ferme intermédiaire, telle que F_3 (f_2), $\quad p_M = \Delta\, p_\alpha$

pour une ferme de rive F_1 : $p'_M = \dfrac{p_\alpha}{2\Delta}\left[k_0 \cdot h\varphi\right]^2$ [5]



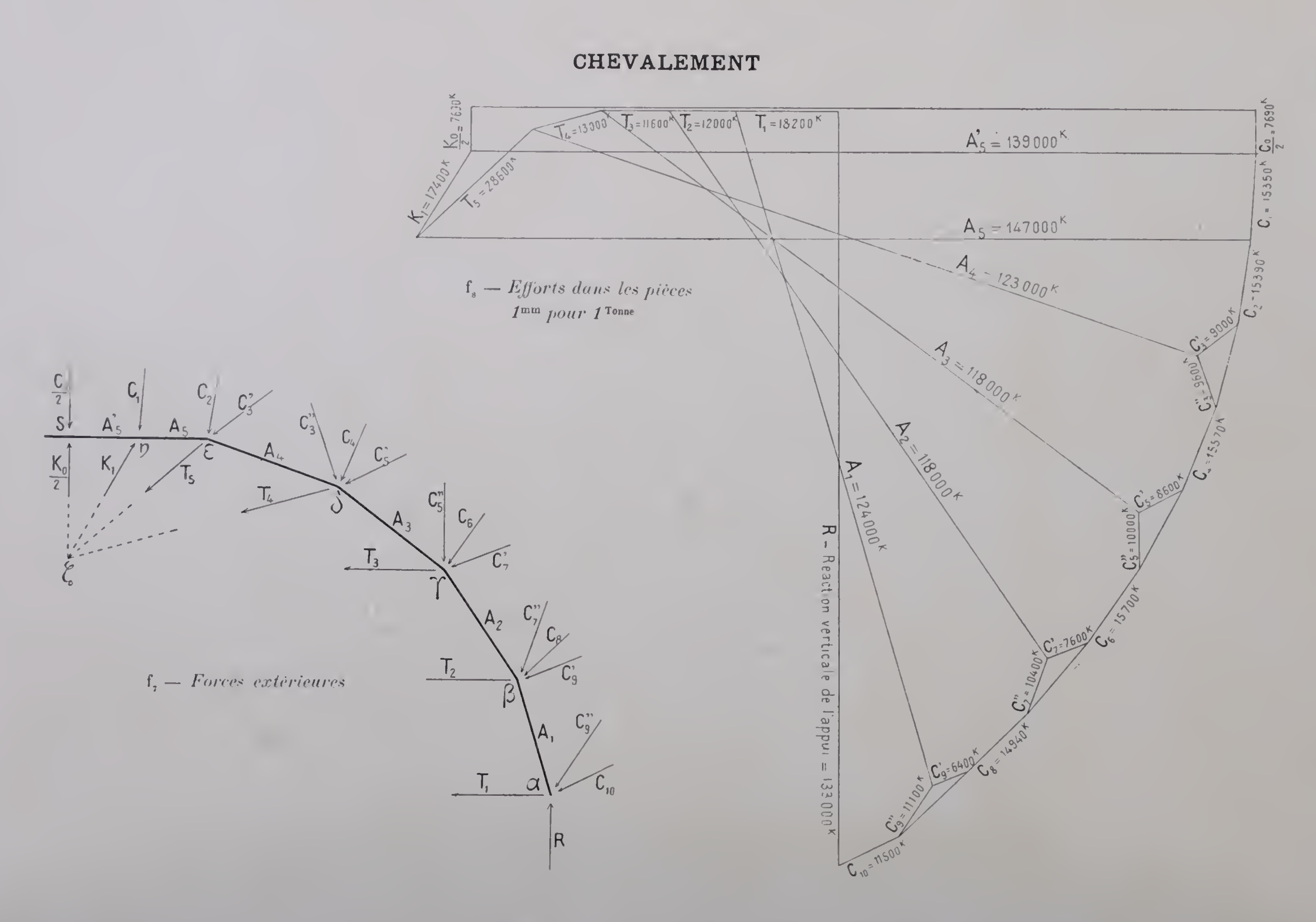
1. — V, p. 132 à 156. 2. — II, p. 70 à 74, pl. 4 et 5. 3. — V, p. 155.

4. — Voir, à la fin du Tome VI, les tables numériques de log $\sqrt{\operatorname{Cos}\frac{4}{3}\alpha}$, $\sqrt{\operatorname{Cos}\frac{4}{3}\alpha}$, pour α de 0° à 67°30'.

5. — La pression sur M (f_3) est $p_\alpha\, dx$, dont la composante en M_1 est $p_\alpha\, dx\, \dfrac{x}{\Delta}$.

Pour la largeur M' M_2, elle est : $\dfrac{p_\alpha}{\Delta} \Sigma_0^{M'} x\ dx = \dfrac{p_\alpha}{2\Delta}\left(k_0 + h\varphi\right)^2$

CHEVALEMENT



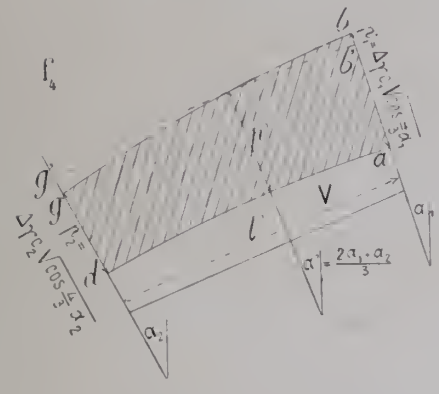
f_8 — *Efforts dans les pièces*
1mm pour 1 Tonne

f₇ — *Forces extérieures*

Voici, détaillé, le calcul d'une ferme intermédiaire :

§ 2. — *EFFORTS DANS LES PIÈCES*

Art. 1. — Vaux.



La pression totale sur le vau V (f_4) est représentée par l'aire *abgd*.

On l'a remplacée par l'aire *ab'g'd* de hauteur constante p' :

$$p' = \Delta \gamma c \sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha'} ,$$

$$\text{avec} \quad \alpha' = \frac{2\alpha_1 + \alpha_2}{3} .$$

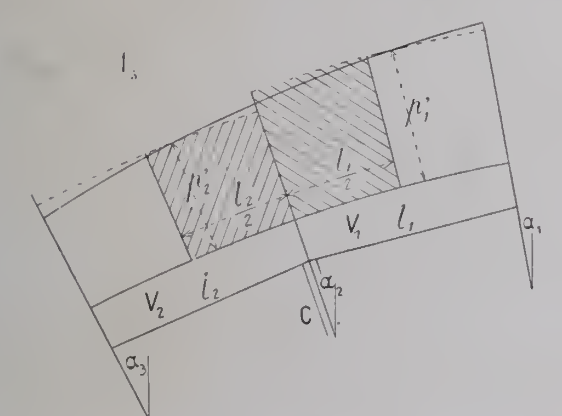
Art. 2. — Contrefiches.

A. — Suivant le rayon.

B. — Inclinées sur le rayon.

Une contrefiche C (f_5) reçoit :

$$P = \frac{1}{2} \Delta \gamma c_1 l_1 \sqrt{\cos \frac{4}{3} \frac{2\alpha_1 + \alpha_2}{3}} (\text{Vau } V_1) + \frac{1}{2} \Delta \gamma c_2 l_2 \sqrt{\cos \frac{4}{3} \frac{2\alpha_2 + \alpha_3}{3}} (\text{Vau } V_2)$$

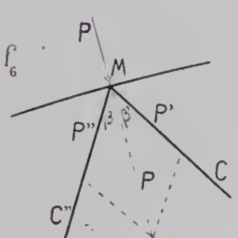


L'effort P en M (f_6) se divise en

$$P' (\text{sur } C') = P \frac{\sin \beta}{\sin (\beta + \beta')}$$

$$P'' (\text{sur } C'') = P \frac{\sin \beta'}{\sin (\beta + \beta')}$$

Art. 3. — Chevalement.



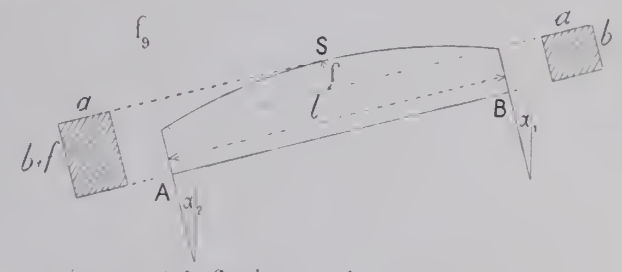
Les efforts intérieurs (compressions dans les arbalétriers, tensions dans les câbles) font équilibre aux forces extérieures (f_7) (réactions des deux appuis, compressions transmises par les contrefiches). C'est ce qu'exprime la fig. 8.

§ 3. — *SECTIONS DES PIÈCES*

Art. 1. — Vaux.

Bien qu'encastrés à leurs abouts, entre eux et avec les contrefiches par les couvre-joints en tôle, on les a calculés comme simplement posés.

	Longueur	Pression par m. c[t] p'	Flèche f	Hauteur aux abouts b calculée	Hauteur aux abouts b adoptée
	m		m	m	
V_1	4.45	3450[k]	0.05	0.48	
V_2	4.45	3440	0.05	0.48	
V_3	4.50	3425	0.06	0.47	
V_4	4.50	3450	0.06	0.47	m
V_5	4.55	3460	0.06	0.48	0.48
V_6	4.55	3470	0.06	0.48	
V_7	4.60	3490	0.06	0.49	
V_8	4.60	3400	0.06	0.48	
V_9	4.10	3100	0.06	0.40	
V_{10}	5.40	3970	0.14	0.54	0.56



$$\mathfrak{M} \left(\begin{array}{c}\text{moment de flexion} \\ \text{maximum}\end{array} \right) = \frac{1}{8} p' \ (\S\ 2,\ \text{art. } 1) \times l^2 =$$

$$\beta \left(\begin{array}{c}\text{effort permis} \\ \text{en K}^g\ \overline{0^m01}^2\end{array} \right) \times 10^4 \times \frac{a(b+f)^2}{6}$$

$$\beta = 80^k \ {}^{6} \qquad a = 0^m23$$

6. — V, p. 156.

Aux ponts de Luxembourg et des Amidonniers[7], les vaux ont été peut-être un peu faibles. On les avait calculés seulement pour ne pas rompre. Il conviendra de s'imposer une flèche maxima[8] fonction de la portée du vau. On avait fait ainsi au pont du Castelet[9], au pont Antoinette[9].

Art 2. — Contrefiches.

Soit φ l'élancement $= \dfrac{l \text{ (longueur libre de la pièce)}}{b \text{ (plus petit côté de la section)}}$

On a admis comme pression moyenne permise par $\overline{0^m01}^2$:

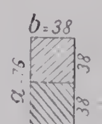
$$\beta_m = \frac{80}{1 + \left(\frac{\varphi}{24}\right)^2}$$ [10, 11]

On a pris pour l la longueur totale de la contrefiche, bien qu'elle soit coupée par un ou deux cours de moises.

	Longueur l	Plus petite dimension b (en élevation)	Elancement $\varphi = \frac{l}{b}$	Compression moyenne permise par $\overline{0.01}^2$ $\beta_m = \frac{80}{1 + \left(\frac{\varphi}{24}\right)^2}$	Effort total P	Section en $\overline{0.01}^2$ $\Omega = ab = \frac{P}{\beta_m}$	Epaisseur $a = \frac{\Omega}{b}$ calculée	Epaisseur $a = \frac{\Omega}{b}$ adoptée
	m			k				
C_0	5.50	21 cm	26	36.80	15380 k	418 cmq	20 cm	
C_1	5.40	19	28	33.88	15350	453	24	
C_2	4.90	19	26	36.80	15390	418	22	
C_3'	6.30	19	33	27.68	9000	325	17	
C_3''	6.80	19	36	24.61	9600	390	21	
C_4	5.30	21	25	38.36	15570	406	19	**23 cm**
C_5'	6.80	19	36	24.61	8600	349	18	
C_5''	7.80	21	37	23.69	10000	422	20	
C_6	6.60	23	29	32.52	15700	483	21	
C_7'	7.80	19	41	20.42	7600	372	20	
C_7''	9.60	23	42	19.69	10400	528	23	
C_8	8.80	23	38	22.81	14940	655	28	
C_9'	9.20	19	48	16.00	6400	400	21	
C_9''	11.50	25	46	17.12	11100	648	25	**25**
C_{10}	11.00	25	44	18.34	11500	627	25	
K_0	6.70	21	32	28.80	15380	534	25	**26**
K_1	7.80	24	33	27.68	17400	630	26	

Art. 3. — Arbalétriers.

Equarrissage adopté :



7. — I, p. 191

f_{10}

8. — Un vau de longueur l, de section supposée constante $a \times b$, prend, sous une charge p par mètre courant, une flèche :

$$z = \frac{5\, p l^4}{32\, E\, a\, b^3} \quad E, \text{ coefficient d'élasticité } = 1{,}2 \times 10^9.$$

$$\frac{z}{l} = \frac{5p}{32\, E a}\left(\frac{l}{b}\right)^3$$

9. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886 — *Construction des ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette*, M. Séjourné, p. 538, 539.

10. — V, p. 156.

11. — Voir plus loin les tables numériques de β_m pour φ de 0 à 50.

	Longueur l	Élancement $\rho = \frac{l}{38}$	Compression moyenne permise par $\overline{0.01}^2$ $\beta_m = \frac{80}{\left(1 + \frac{\rho}{24}\right)^2}$	Effort total P	Section en $\overline{0.01}^2$ $\Omega = ab = \frac{P}{\beta_m}$	Hauteur $a = \frac{\Omega}{38}$ calculée	Hauteur $a = \frac{\Omega}{38}$ adoptée
A_1	7m30	19	49k18	124000k	2521cmq	66cm	
A_2	7.65	20	47.21	118000	2499	66	
A_3	7.85	21	45.31	118000	2604	68	76cm
A_4	7.90	21	45.31	123000	2715	71	
A_5	4.00	10	68.17	147000	2156	57	

	Tension T	Travail par $\overline{0.001}^2$ $\frac{T}{\Omega}$ [12]
T_1	18.200k	25k
T_2	12.000	16.5
T_3	11.600	16
T_4	13.000	17.8
T_5', T''	28.600	19.6

Art. 4. — Câbles.

Chaque câble a été fait de 61 fils de 3mm9.

Section utile :

$$\Omega = 728^{mmq}7.$$

CHAPITRE II

COUCHIS

Bien que d'une seule pièce et cloués sur les vaux, on les a calculés comme coupés au droit de chaque ferme et simplement posés dessus.

f_{11}. — Coupe en travers

f_{12}. — Coupe en long

On a admis : $\frac{a}{b} = \frac{5}{7}$ [13] ; $a = 0^m10$, $b = 0^m14$.

La pression par mètre courant de couchis, à α de la clef, est :

$$p_\alpha \left(\begin{matrix}\text{pression par mq.}\\ \text{de douelle}\end{matrix}\right) \times e$$

$$\mathfrak{M}\left(\begin{matrix}\text{moment de flexion}\\ \text{maximum}\end{matrix}\right) = \frac{1}{8} p_\alpha e \Delta^2 = 10^4 \beta \left(\begin{matrix}\text{travail maximum}\\ \text{permis en K}^g\ \overline{0^m01}^2\\ = 80^k\end{matrix}\right) \times \frac{1}{6} ab^2$$ [14]

Ici : $$e = \frac{1306,66}{p_\alpha \Delta = p \left(\begin{matrix}\text{pression par mc}^t\text{ d'arc}\\ \text{indiquée sur } f_1\end{matrix}\right)}$$

On trouve :

Entre 0° et 51° (sommiers), de 0m38 à 0m43 : on a adopté 0m38 ;
au-dessous, de 0m23 à 0m39 : on a adopté 0m25.

12. — V, p. 156. 13. — V, p. 134.

14. — e croît de la clef aux reins ; il est infini pour $p = 0$ ($\alpha = 67°30'$) ; la dépense en couchis par mètre courant de ferme est proportionnelle à $\frac{ab}{e} = \frac{3 p_\alpha \Delta^2}{4 \beta \times 10^4 b}$: il y aurait donc théoriquement économie, pour une épaisseur donnée de platelage, à augmenter la hauteur et l'espacement des couchis.

LIVRE II

COMMENT ON CALCULE UNE VOÛTE

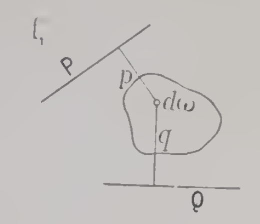
ARC ÉLASTIQUE INARTICULÉ

SUR APPUIS IMMOBILES

MÉTHODE CULMANN-RITTER

TITRE I

PRÉAMBULE



MOMENTS DU SECOND DEGRÉ D'UNE SURFACE Ω PAR RAPPORT :

A UNE DROITE P ($\Sigma p^2 d\omega$, **moment d'inertie**)

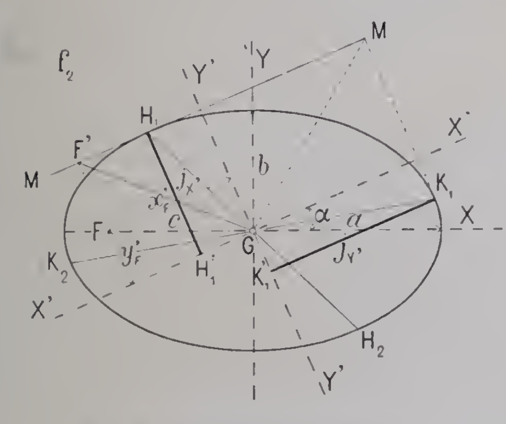
A DEUX DROITES P,Q ($\Sigma pq\,d\omega$, **moment centrifuge**[1], $\mathbf{f_1}$)

CHAPITRE I

MOMENTS PAR RAPPORT A DEUX AXES PASSANT PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ

§ 1. — *LES DEUX AXES SONT RECTANGULAIRES* (f_2)

Art. 1. — On a les moments $I_{X^2} = \Omega b^2$, $I_{Y^2} = \Omega a^2$ par rapport aux axes GX, GY de l'ellipse centrale d'inertie. Calculer les moments $I_{X'^2}$, $I_{Y'^2}$, $I_{X'Y'}$ par rapport à deux autres axes rectangulaires GX', GY'.



Traçons les diamètres H_1H_2, K_1K_2 conjugués à GX', GY' : abaissons les perpendiculaires $H_1H_1' = j_{X'}$ $K_1K_1' = j_{Y'}$

Ce sont les rayons de gyration relatifs aux axes X' et Y'

$\Sigma y'^2 d\omega = I_{X'^2} = \Omega j^2_{X'}$. *C'est le moment d'inertie par rapport à GX' de la surface Ω concentrée en H_1.*

$\Sigma x'^2 d\omega = I_{Y'^2} = \Omega j^2_{Y'}$. *C'est le moment d'inertie par rapport à GY' de la surface Ω concentrée en K_1.*

$$\Sigma x'y'\,d\omega \text{ (moment centrifuge)} = I_{X'Y'} = \Omega\,(a^2 - b^2)\sin\alpha\cos\alpha$$

$$= \Omega \times c\sin\alpha \times c\cos\alpha = \Omega\, x'_F\, y'_F$$

C'est le moment centrifuge par rapport à GX', GY' de la surface Ω concentrée à un foyer.

Les tangentes en H_1, K_1, les points H_1, K_1 sont très simplement obtenus en considérant l'ellipse comme la projection du cercle de rayon a.

Art. 2. — On a les moments $I_{X'^2} = \Omega j^2_{X'}$, $I_{Y'^2} = \Omega j^2_{Y'}$, $I_{X'Y'}$ par rapport à deux axes rectangulaires quelconques GX', GY'. Trouver les directions GX, GY et les longueurs a, b, des axes de l'ellipse centrale.

GX est incliné sur GX' d'un angle α tel que : $\operatorname{tg} 2\alpha = \dfrac{2\, I_{X'Y'}}{I_{Y'^2} - I_{X'^2}}$

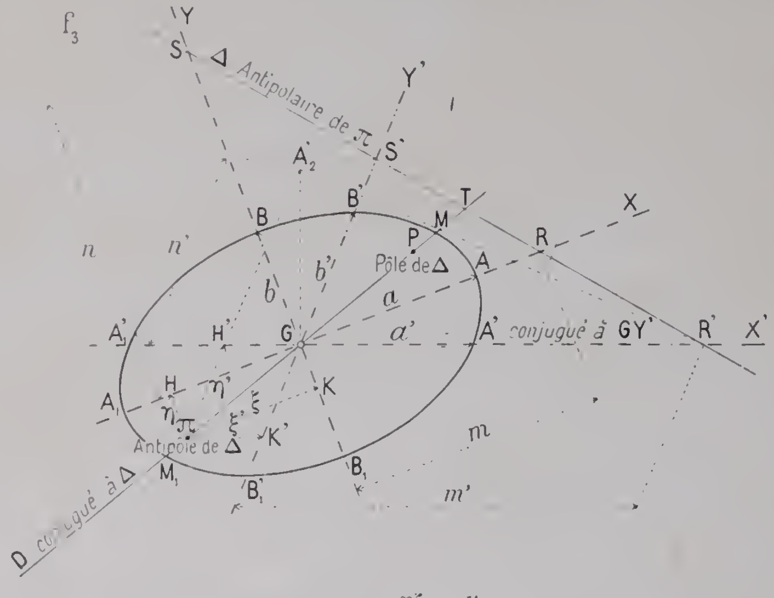
$$a^2 + b^2 = j^2_{X'} + j^2_{Y'} = \overline{GM}^2 \qquad a^2 - b^2 = c^2 = \frac{2\, I_{X'Y'}}{\Omega \sin 2\alpha}$$

Avec c, on place sur GX le foyer F : à $j_{X'}$ de GX', on mène la droite MM, (c'est une tangente). On abaisse sur elle la perpendiculaire FF' ; $F'G = a$.

1. — Désignation acceptée, sans doute à défaut d'une meilleure, par Culmann, Ritter, par MM. Guidi, Kœchlin....

§ 2. — *LES DEUX AXES SONT DEUX DIAMÈTRES CONJUGUÉS DE L'ELLIPSE CENTRALE D'INERTIE*

Art. 1. — Antipôle π d'une droite Δ, antipolaire Δ d'un point π, par rapport à une ellipse donnée par ses axes a, b ou par deux diamètres conjugués a', b' ($\mathbf{f}_3$).



Soient une droite Δ et P son pôle. Son antipôle π est le symétrique de P par rapport au centre G.

Δ est polaire de P, antipolaire de π : elle est conjuguée au diamètre D de P et π.

G est entre π et Δ. Si Δ coupe l'ellipse, π est hors de l'ellipse et réciproquement : si Δ passe par G, π est à l'infini sur D.

L'équation de Δ est, rapportée :

aux axes principaux GX, GY : $\dfrac{x\xi}{a^2} + \dfrac{y\eta}{b^2} = -1$

à 2 diamètres conjugués GX', GY' : $\dfrac{x'\xi'}{a'^2} + \dfrac{y'\eta'}{b'^2} = -1$

Sont « anticonjugués »[2] les points des groupes (f_3)

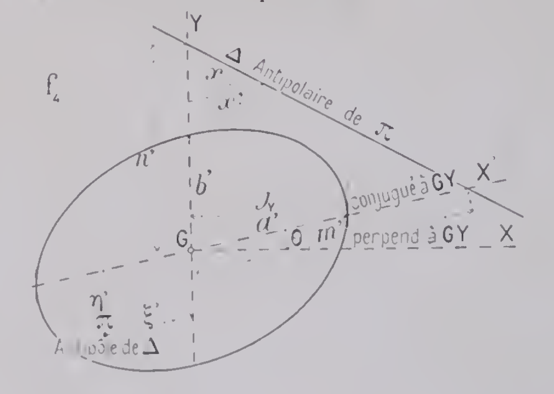
H,R A,A_1 K,S B,B_1 H',R' A',A'_1 K',S' B',B_1' π,T M,M_1

c'est-à-dire que : $m\xi = a^2$ $n\eta = b^2$ $m'\xi' = a'^2$ $n'\eta' = b'^2$ $GT \times G\pi = \overline{GM}^2$

Ayant R' (du groupe H'R', A'A'_1), on aura ainsi H' : élever une perpendiculaire $GA'_2 = a'$, joindre R'A'_2, mener A'_2H' perpendiculaire à R'A'_2 ; ayant H', on fera de même pour avoir R'.

Art. 2. — Deux expressions du moment d'inertie.

Soient (f_4) GX' GY 2 diamètres conjugués — Δ une droite quelconque les coupant à m', n' de G — π (ξ' η') l'antipôle de Δ.



$$I_{Y^2}\left(\begin{matrix}\text{les } x \text{ comptés}\\ \text{parall. à GX}\end{matrix}\right) = \Sigma x^2 d\omega = \Omega j_Y^2 = \Omega a'^2 \cos^2\theta$$

$$I_{Y^2}\left(\begin{matrix}\text{les } x \text{ comptés}\\ \text{parall. à GX'}\end{matrix}\right) = \Sigma x'^2 d\omega = \frac{1}{\cos^2\theta}\,\Sigma x^2 d\omega = \Omega a'^2 = m'\xi\Omega$$

$$I_{X'^2}\left(\begin{matrix}\text{les } y \text{ arrêtés}\\ \text{à GX'}\end{matrix}\right) = \Sigma y'^2 d\omega = \Omega b'^2 = n'\eta'\Omega$$

Le moment centrifuge est nul.

f_5

B'

AB/2 AB/2

A H G B K

2. — Soient (f_5) A, B, 2 points : G le milieu de AB ; si H et K sont « anticonjugués » par rapport à A,B

$$GK \times GH \quad \overline{GB}^2$$

G est entre H et K

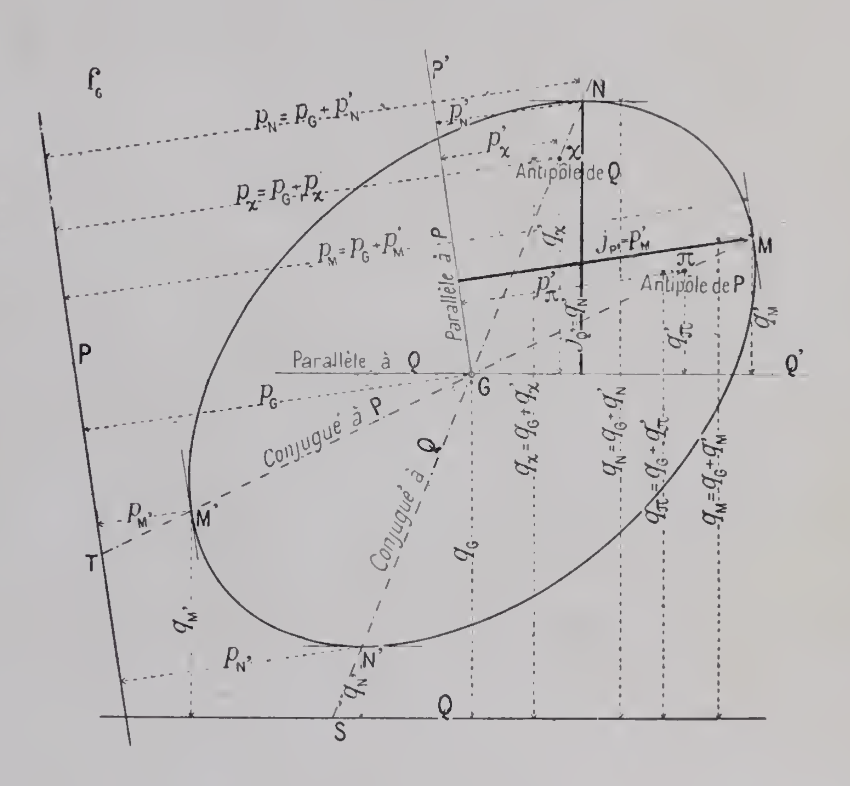
Elevons la perpendiculaire GB' GB. Fixons en B' le sommet d'un angle droit : ses côtés coupent AB en 2 points anticonjugués de A et B.

MOMENTS PAR RAPPORT A DES AXES P, Q NE PASSANT PAS PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ

§ 1. — 1re EXPRESSION. — *EN FONCTION DES MOMENTS PAR RAPPORT AUX AXES PARALLÈLES* P', Q' *PASSANT PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ ET DES DISTANCES DE CE CENTRE A* P *ET* Q (f_6)

$$\Sigma p^2\, d\omega = I_{P^2} = I_{P'^2} + \Omega p_G^2 = \Omega(j_{P'}^2 + p_G^2)$$
$$\Sigma q^2\, d\omega = I_{Q^2} = I_{Q'^2} + \Omega q_G^2 = \Omega(j_{Q'}^2 + q_G^2)$$
$$\Sigma pq\, d\omega = I_{PQ} = I_{P'Q'} + \Omega p_G\, q_G$$

Les moments par rapport à deux axes P, Q *sont égaux aux moments par rapport à deux axes parallèles* P', Q' *menés par le centre de gravité, augmentés des moments par rapport aux axes* P, Q *de la surface* Ω *concentrée au centre de gravité.*



§ 2. — 2me EXPRESSION *EN FONCTION DES COORDONNÉES DES EXTRÉMITÉS DES DIAMÈTRES CONJUGUÉS AUX AXES DES MOMENTS*

$$j_{P'}^2 + p_G^2 = \frac{1}{2}\left(p_M^2 + p_{M'}^2\right)$$
$$j_{Q'}^2 + q_G^2 = \frac{1}{2}\left(q_N^2 + q_{N'}^2\right)$$

On obtient le moment d'inertie par rapport à un axe en concentrant $\frac{\Omega}{2}$ *aux extrémités du diamètre conjugué à cet axe.*

$$I_{PQ} = \frac{\Omega}{2}\left[p_M q_M + p_{M'} q_{M'}\right] = \frac{\Omega}{2}\left[p_N q_N + p_{N'} q_{N'}\right]$$

On obtient le moment centrifuge par rapport à deux axes en concentrant $\frac{\Omega}{2}$ *aux extrémités du diamètre conjugué à l'un des axes.*

Pour P' et Q'. $p_M = p_{M'} = p'_M$, $q_M = q_{M'} = q'_M$ ....

$$I_{P'Q'} = \Omega p'_M q'_M = \Omega p'_N q'_N$$

§ 3. — 3me EXPRESSION. — *EN FONCTION DES DISTANCES AUX AXES D'UN ANTIPÔLE ET DU CENTRE DE GRAVITÉ (Théorème de Culmann.)*[3]

Art. 1. — Moment centrifuge.

Soient (f_6) π, χ les antipôles de 2 axes P et Q par rapport à l'ellipse centrale de la surface Ω

On a trouvé :

au § 1 $\quad I_{PQ} = I_{P'Q'} + \Omega p_G q_G.$ $\qquad$ au § 2 $\quad I_{P'Q'} = \Omega p'_M q'_M = \Omega p'_N q'_N$

$$\text{d'où : } I_{PQ} = \Omega\left(p_G q_G + p'_M q'_M \text{ ou } p'_N q'_N\right) = \Omega p_G \left\{ q_G + \frac{p'_M q'_M}{p_G} \right\} = \Omega q_G \left\{ p_G + \frac{p'_N q'_N}{q_G} \right\}$$

Comme π et χ sont les antipôles de P et Q,

$$\overline{GM}^2 = G\pi \times GT \quad \text{ou} \quad \frac{GM}{GT} = \frac{G\pi}{GM} \quad \text{ou} \quad \frac{p'_M}{p_G} = \frac{q'_\pi}{q'_M} \quad \text{ou} \quad \frac{p'_M q'_M}{p_G} = q'_\pi$$

$$\overline{GN}^2 = G\chi \times GS \quad \text{ou} \quad \frac{GN}{GS} = \frac{G\chi}{GN} \quad \text{ou} \quad \frac{q'_N}{q_G} = \frac{p'_\chi}{p'_N} \quad \text{ou} \quad \frac{p'_N q'_N}{q_G} = p'_\chi$$

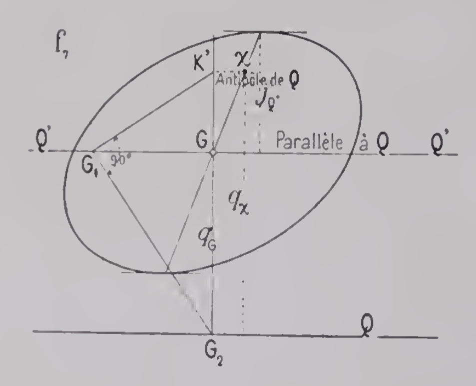
Donc : $I_{P,Q} = \Omega p_G q_\pi = \Omega q_G p_\chi$

Ainsi *le moment centrifuge de Ω par rapport à P et Q est égal au produit de Ω par 2 distances : celle du centre de gravité à l'un des axes ; celle de l'antipôle de cet axe à l'autre axe.*

Art. 2. — Moment d'inertie.

Si les 2 axes P et Q se confondent, I_{PQ} est le moment d'inertie :

$$I_{Q^2} = \Omega q_G q_\chi \ (f_7).$$



Le moment d'inertie de Ω par rapport à l'axe Q est égal au produit de Ω par les distances à Q du centre de gravité et de l'antipôle de Q :

au § 1, on a trouvé : $I_{Q^2} = \Omega\left(j^2_{Q'} + q^2_G\right)$

On a donc $j^2_{Q'} + q^2_G = q_G q_\chi \qquad q_\chi = \frac{j^2_{Q'}}{q_G} + q_G$

D'où cette construction simple de la distance à un axe Q de son antipôle :

prendre $GG_1 = j_{Q'}$; tirer G_1G_2. Lui élever en G_1 une perpendiculaire G_1K' : $K'G_2 = q_\chi$

3. — Culmann — Professeur à l'Ecole Polytechnique de Zurich. « *Die graphische Statik* ». Zurich, chez Meyer et Zeller. 1re édition 1866 — 2me édition 1875. Le 1er volume seul en a paru. Il a été traduit par MM. Glasser, Jacquier et Valat — Paris, Dunod 1880.

L'expression du moment centrifuge en fonction de la distance des antipôles est indiquée dans l'édition de 1875 *(allemand p. 401 — traduction française, p. 377-378).*

TITRE II

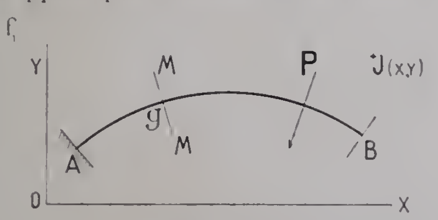
COMMENT, EN PRINCIPE, ON DÉTERMINE LES RÉACTIONS DES APPUIS DUES A UNE FORCE P MÉTHODE, FORMULES

CHAPITRE I

MOUVEMENTS, SOUS L'ACTION D'UNE FORCE **P** (f_1), D'UN POINT **J** (X,Y) INVARIABLEMENT LIÉ A UNE RETOMBÉE **B**, SUPPOSÉE LIBRE, D'UN ARC ÉLASTIQUE DONT L'AUTRE RETOMBÉE **A** DEMEURE IMMOBILE

§ 1. — *PRÉLIMINAIRES*

Considérons un arc inarticulé, symétrique par rapport au plan vertical Y O X (f_1). On suppose que toutes les forces extérieures agissent dans ce plan.[1]



A B, sa fibre moyenne, est le lieu des centres de gravité des sections transversales, telles que Mg M, faites par des plans normaux au plan YOX, et dont les traces MM sur ce plan sont également inclinées sur l'intrados et l'extrados ; c'est, en pratique, la ligne des milieux des joints normaux à l'intrados.[1]

Appliquons à l'arc une force P.

Dans la réalité, ses deux retombées A, B resteront immobiles ; mais imaginons que la retombée de gauche A demeure seule fixe sur son appui, et que celle de droite B soit libre.

Sous l'action de P, la partie de l'arc entre l'appui de gauche A et P se déformera ; celle entre P et l'appui de droite ne subira aucune déformation, mais sera entraînée par les mouvements de celle de gauche.

On va étudier les mouvements d'un point J(X,Y) invariablement lié à l'extrémité B, c'est-à-dire calculer les variations $\mathcal{D}$X, $\mathcal{D}$Y de ses coordonnées et déterminer de quel angle $\mathcal{D}\theta$ il tourne, et autour de quel point.

On calculera successivement : d'abord, les variations dX, dY, $d\theta$, dues à la déformation d'une tranche infiniment mince telle que MM (f_1) ; puis les variations ΔX, ΔY, $\Delta\theta$, pour une tranche d'épaisseur finie dans laquelle sont constants le coefficient d'élasticité E et le moment d'inertie I de la section transversale de l'arc ; enfin, les variations $\mathcal{D}$X, $\mathcal{D}$Y, $\mathcal{D}\theta$, pour la déformation de l'ensemble de toutes les tranches de l'arc entre l'appui immobile de gauche A et la force P.

§ 2. — *VARIATIONS dX, dY, DUES A LA DÉFORMATION D'UNE TRANCHE INFINIMENT MINCE*
ANGLE DE ROTATION dθ ET CENTRE DE ROTATION

Art. 1. — Effort normal N. Couple de flexion $\mathcal{M}$ (f_2).

Au point S (f_2), je décompose P en :

N, perpendiculaire à MM, effort normal qui contracte ou dilate la tranche ;

T suivant MM, effort tangentiel, dit effort tranchant, qui produit un glissement transversal à la fibre moyenne : dans les voûtes en maçonnerie, on convient de le négliger.[1]

1. — Dit, Tome III, p. 351.

Par g, je mène deux forces égales et parallèles à N et de sens contraires, N', N".

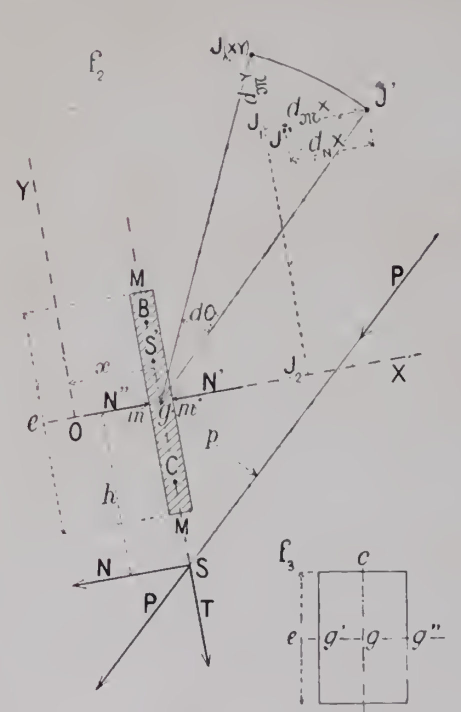
MM est soumis :

à l'effort normal N' = N, appliqué en g ;

au couple de flexion (ou moment fléchissant) $\mathfrak{M} = N \times h = P \times p$

Art. 2. — Effet du couple de flexion $\mathfrak{M}$.

$\mathfrak{M}$ fait tourner la face m' de la tranche par rapport à la face m (f_2) d'un angle $d\theta$.



Dans les cours de Résistance des Matériaux, on enseigne que :

$$d\theta = \frac{\mathfrak{M}\,dx}{E\,I} = \frac{Pp\,dx}{E\,I}$$

E, coefficient d'élasticité de l'arc en MM ;

I, moment d'inertie de la section MM par rapport à l'axe transversal $g'g''$ (f_3). Cette section est (en négligeant le fruit transversal, s'il y en a un) un rectangle de largeur c, de hauteur $e = MM$ (épaisseur de l'arc en M)

$$I = \frac{1}{12}\,c\,e^3$$

Sous l'action de $\mathfrak{M}$, J, invariablement lié à l'extrémité de droite de l'arc supposée libre, tourne de $d\theta$ autour de g et vient en J'.

Arc J J' $= g\,J\,d\theta$ D'où : [2]

$$d_{\mathfrak{M}}X = -Y d\theta \qquad d_{\mathfrak{M}}Y = (X - x)\,d\theta$$

Art. 3. — Effet de l'effort normal N.

N' produit suivant OX une compression ou un allongement :

$$\frac{N\,dx}{E\,\Omega} = \frac{Pp\,dx}{h\,E\,\Omega}$$

J, déjà venu en J' sous l'action du couple Pp, vient sous l'action de N' en J" (f_2). J' J" est parallèle à OX et égal à l'allongement ou au raccourcissement de la tranche :

$$d_N X = J'\,J'' = \frac{Pp\,dx}{h\,E\,\Omega}$$

Art. 4. — Effet résultant.

$$dX = d_{\mathfrak{M}}X + d_N X = \frac{Pp\,dx}{E\,I}\left(-Y + \frac{I}{h\Omega}\right) = -\frac{Pp\,dx}{E\,I}\left(Y - \frac{e^2}{12\,h}\right)$$

$$dY = d_{\mathfrak{M}}Y = \frac{Pp\,dx}{E\,I}\,(X - x)$$

J peut donc venir directement en J" en tournant de $d\theta = \frac{Pp\,dx}{E\,I}$ autour de S' $\left(x, \frac{e^2}{12\,h}\right)$ point de la section M « anticonjugué » de S par rapport à deux points B, C, tels que $g\,B = g\,C = \frac{e}{\sqrt{12}}$

2. — Les deux triangles rectangles J J' J_1, g J J_2 (f_2) sont semblables ; on a (au signe près) :

$$\frac{d_{\mathfrak{M}}X}{Y} = \frac{d_{\mathfrak{M}}Y}{X - x} = \frac{J\,J' = g\,J\,d\theta}{g\,J} = d\theta$$

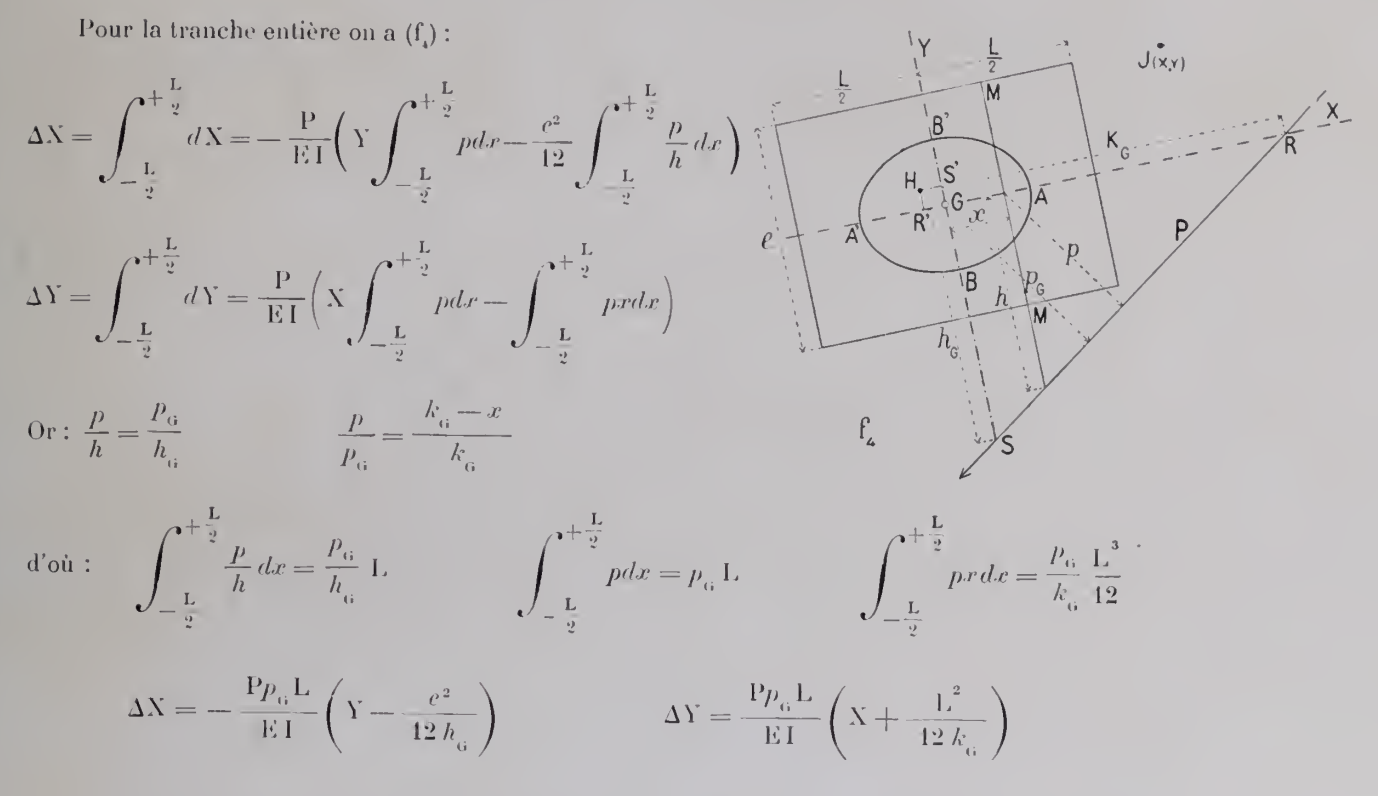
Les $d\theta$, comme les Pp, sont > 0 dans le sens OX vers OY.

§ 3. — *VARIATIONS* ΔX, ΔY *DUES A LA DÉFORMATION D'UNE TRANCHE RECTANGULAIRE EN ÉLÉVATION DE LONGUEUR FINIE* L, *DANS LAQUELLE* E *ET* I *PEUVENT ÊTRE SUPPOSÉS CONSTANTS*

Pour la tranche entière on a (f_4) :

$$\Delta X = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} dX = -\frac{P}{EI}\left(Y\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} p\,dx - \frac{e^2}{12}\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{p}{h}\,dx\right)$$

$$\Delta Y = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} dY = \frac{P}{EI}\left(X\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} p\,dx - \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} px\,dx\right)$$



Or : $\dfrac{p}{h} = \dfrac{p_G}{h_G}$ $\qquad \dfrac{p}{p_G} = \dfrac{k_G - x}{k_G}$

d'où : $\displaystyle\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{p}{h}\,dx = \frac{p_G}{h_G}\,L \qquad \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} p\,dx = p_G\,L \qquad \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} px\,dx = \frac{p_G}{k_G}\,\frac{L^3}{12}$

$$\Delta X = -\frac{Pp_G L}{EI}\left(Y - \frac{e^2}{12\,h_G}\right) \qquad \Delta Y = \frac{Pp_G L}{EI}\left(X + \frac{L^2}{12\,k_G}\right)$$

Les axes de l'ellipse centrale de la tranche sont : $a = \dfrac{L}{\sqrt{12}}$ $\qquad b = \dfrac{e}{\sqrt{12}}$

Soit H le point de coordonnées : $GR' = \dfrac{a^2}{k_G}$ $\qquad GS' = \dfrac{b^2}{h_G}$

R' et S' sont les anticonjugués des traces R et S de P par rapport aux sommets de l'ellipse AA', BB'.

H est donc l'antipôle de la force P.

Ainsi P fait tourner de $\dfrac{Pp_G L}{EI}$ *autour de son antipôle la section extrême de droite de la tranche.*

§ 4. — *VARIATIONS* $\mathcal{D}$X, $\mathcal{D}$Y *DUES A LA DÉFORMATION D'UNE SUITE DE TRANCHES RECTANGULAIRES EN ÉLÉVATION DANS CHACUNE DESQUELLES* **E** *ET* **I** *PEUVENT ÊTRE SUPPOSÉS CONSTANTS*

Art. 1. — Pour un point quelconque invariablement lié à l'appui libre. Ellipse élastique. Centre élastique.

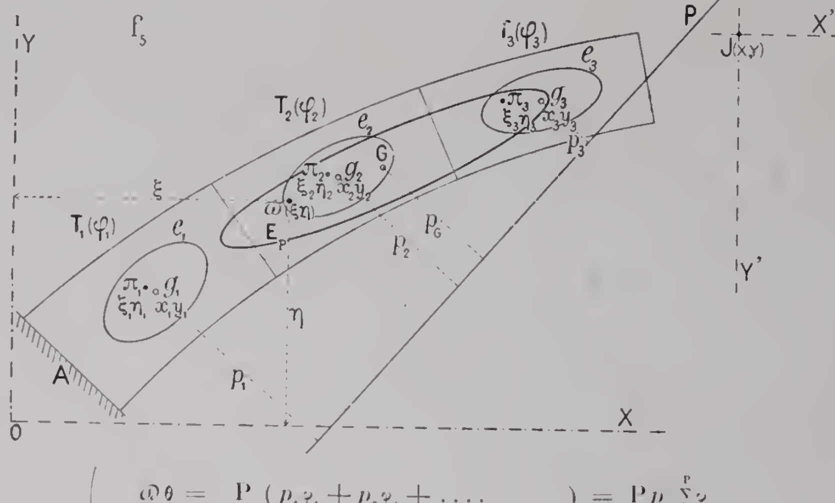
Par la déformation de toutes les tranches à gauche de P, un point J invariablement lié à l'extrémité de droite B aura tourné de :

$$\mathcal{D}\theta = \Sigma\Delta\theta = \mathrm{P}\left(\frac{p_1 \mathrm{L}_1}{\mathrm{E}_1 \mathrm{I}_1} + \frac{p_2 \mathrm{L}_2}{\mathrm{E}_2 \mathrm{I}_2} + \dots \quad \dots\right)$$

Posons :

$$\varphi_1 = \frac{\mathrm{L}_1}{\mathrm{E}_1 \mathrm{I}_1}, \quad \varphi_2 = \frac{\mathrm{L}_2}{\mathrm{E}_2 \mathrm{I}_2}, \quad \dots$$

quantités dites par Ritter : poids élastiques.[3]



Traçons (f_5) les ellipses centrales d'inertie e_1, e_2, ... des rectangles T_1, T_2, ...

Soient ξ_1, η_1, ξ_2, η_2,... les coordonnées des antipôles π_1, π_2, ... de P par rapport à ces ellipses.

$$\left\{\begin{aligned} \mathcal{D}\theta &= \mathrm{P}\,(p_1\varphi_1 + p_2\varphi_2 + \dots \qquad) = \mathrm{P}\,p_{\mathrm{G}}\sum_{\mathrm{A}}^{\mathrm{P}}\varphi \\ \mathcal{D}\mathrm{X} &= \Sigma\Delta\mathrm{X} = -\mathrm{P}\,[p_1\varphi_1(\mathrm{Y}-\eta_1) + p_2\varphi_2(\mathrm{Y}-\eta_2) + \dots] \\ &\qquad = -\mathrm{PY}\,(p_1\varphi_1 + p_2\varphi_2 + \dots) + \mathrm{P}\,(p_1\eta_1\varphi_1 + p_2\eta_2\varphi_2 + \dots) \\ \mathcal{D}\mathrm{Y} &= \Sigma\Delta\mathrm{Y} = \mathrm{P}\,[p_1\varphi_1(\mathrm{X}-\xi_1) + p_2\varphi_2(\mathrm{X}-\xi_2) + \dots] \\ &\qquad = \mathrm{PX}\,(p_1\varphi_1 + p_2\varphi_2 + \dots) - \mathrm{P}\,(p_1\xi_1\varphi_1 + p_2\xi_2\varphi_2 + \dots) \end{aligned}\right.$$

Le produit $p_1\eta_1\varphi_1$ est le moment centrifuge[4] par rapport à P et à OX de la masse φ_1 uniformément étalée sur le rectangle T_1 : $p_1\xi_1\varphi_1$ est son moment centrifuge par rapport à P et à OY.

Traçons l'ellipse centrale d'inertie E_P du système de masses φ_1, φ_2,.... étalées sur les tranches rectangulaires T_1, T_2.... entre l'appui A et P.

Soit $\varpi\,(\xi, \eta)$ l'antipôle par rapport à E_P de la force P.

$$\sum_{\mathrm{A}}^{\mathrm{P}} p_1\eta_1\varphi_1 = p_{\mathrm{G}}\,\eta\sum_{\mathrm{A}}^{\mathrm{P}}\varphi \;[4] \qquad\qquad \sum_{\mathrm{A}}^{\mathrm{P}} p_1\xi_1\varphi_1 = p_{\mathrm{G}}\,\xi\sum_{\mathrm{A}}^{\mathrm{P}}\varphi \;[4]$$

Donc :

$$\frac{\mathcal{D}\theta}{\mathrm{P}}\left(\begin{matrix}\text{rotation}\\ \text{pour une}\\ \text{force 1}\end{matrix}\right) = p_{\mathrm{G}}\sum_{\mathrm{A}}^{\mathrm{P}}\varphi \text{ moment statique des } \varphi \text{ par rapport à P.}$$

3. — Ritter. « Anwendungen der graphischen Statik » Zurich 1888 (Applications de la statique graphique Ire Partie, p. 155).

4. — Théorème de Culmann p. 122.

Déplacement de J (X,Y) sous une force P

suivant JY'

$\frac{\mathcal{D}Y}{P} = (X - \xi)\, p_G \sum_A^P \varphi = (X - \xi)$ distance de ϖ (antipôle, centre de rotation) à la direction JY' du déplacement $\times\, p_G \sum_A^P \varphi$, moment statique des φ par rapport à P, lequel est la rotation autour de ϖ.

$= \sum_A^P \varphi$ (somme des poids élastiques) $\times\, p_G$ (distance à P du centre de gravité des φ) $\times\, (X - \xi)$ distance à la direction JY' de l'antipôle ϖ.

= Moment centrifuge des φ par rapport à P et JY'

suivant JX'

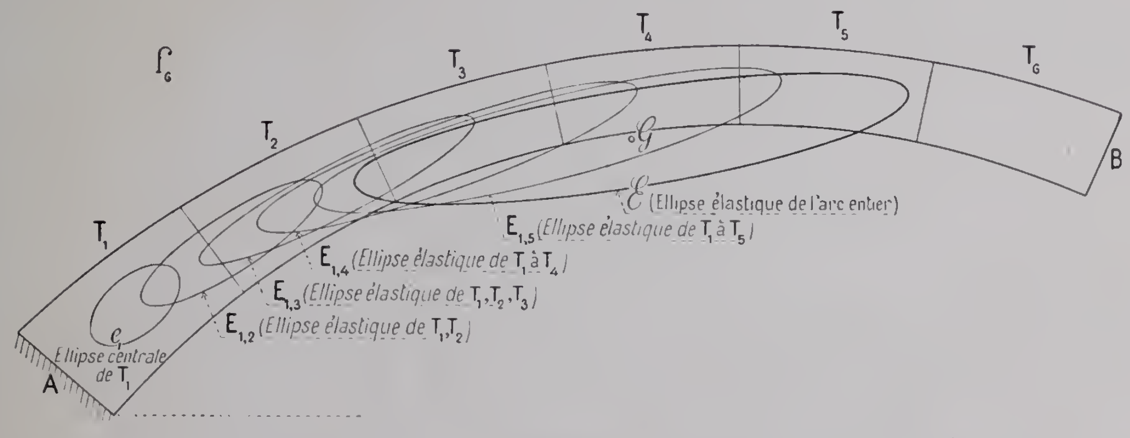
$\frac{\mathcal{D}X}{P} = -(Y - \eta)\, p_G \sum_A^P \varphi = -(Y - \eta)$ distance de ϖ (antipôle, centre de rotation) à la direction JX' du déplacement $\times\, p_G \sum_A^P \varphi$ moment statique des φ par rapport à P, lequel est la rotation autour de ϖ.

$= \sum_A^P \varphi$ (somme des poids élastiques) $\times\, p_G$ (distance à P du centre de gravité des φ) $\times\, (Y - \eta)$ distance à la direction JX' de l'antipôle ϖ.

= Moment centrifuge des φ par rapport à P et JX'.

Ainsi une force P produit sur l'extrémité libre B et sur tout point J qui lui est invariablement lié, une rotation $P p_G \sum_A^P \varphi$ autour de son antipôle par rapport à l'ellipse centrale des poids élastiques φ_1, φ_2, ... entre l'appui fixe et P (E_p de f_5). Appelons-la l'ellipse « élastique »[5] de cette partie d'arc.

L'ellipse centrale $\mathcal{E}$ (f_6) de toutes les masses φ jusqu'à l'appui de droite est l'ellipse « élastique »[5] de l'arc : son centre $\mathcal{G}$ est le centre élastique ; c'est le centre de gravité des masses φ concentrées aux centres des ellipses des tranches.



5. — Culmann a, le premier, indiqué cette ellipse* : il l'appelait « ellipse centrale des $\frac{ds}{EI}$ ». Son successeur à l'Ecole de Zurich, W. Ritter en a fort développé l'application**, sous le nom d'ellipse d'élasticité.

Comme on désigne ainsi une autre ellipse, on peut appeler celle-ci « ellipse élastique ».

On arrive vite à la notion de cette ellipse, mais à l'aide de théorèmes qui ne sont pas couramment enseignés dans nos cours. Sur ce sujet, on lira très utilement : de Ritter, un appendice à la 3e Partie de ses « *Applications de la Statique graphique* »*** ; de M. le Professeur Guidi : « *l'Ellisse di Elasticità nella scienza delle costruzioni* » Turin 1904.

J'ai suivi une méthode moins élégante, qui ne suppose que des connaissances élémentaires usuelles.

* Culmann « *Die graphische Statik* » — p. 122 renvoi 3 — Traduction française p. 530.

** Ritter « *Anwendungen der graphischen Statik nach Professor Culmann.* (2me Partie p. 117, 169 Zurich, 1890 — *** 3e Partie p. 259 Zurich, 1900 — 4e Partie p. 197 Zurich, 1906).

Les rotations $Pp_1\varphi_1$, $Pp_2\varphi_2$, ... s'effectuent autour de l'antipôle de P par rapport aux ellipses des tranches T_1 T_2, ... (f_3) Elles se composent comme des forces parallèles[6] en une rotation résultante autour de ϖ antipôle de P par rapport à l'ellipse élastique de l'ensemble des tranches à gauche de P, antipôle qui est ainsi le centre de gravité des rotations $Pp_1\varphi_1$, $Pp_2\varphi_2$, ... appliquées aux antipôles de P par rapport aux ellipses de chaque tranche.

Art. 2. — Pour le centre élastique de l'arc.

Considérons le centre élastique $\mathcal{G}$, de l'arc entier comme invariablement lié à l'appui libre B (f_8) ; prenons-le comme origine des coordonnées et calculons ses déplacements.

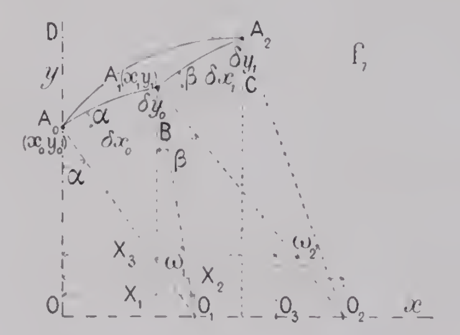
Les formules de l'art. 1, avec $X = 0$ $Y = 0$, deviennent :

$$\frac{\mathcal{M}}{P} \left(\begin{matrix}\text{rotation}\\ \text{sous une}\\ \text{force 1}\end{matrix}\right) = p_G \sum_A^P \varphi$$ moment statique des φ par rapport à P.

Déplacements du centre élastique sous une force 1

Suivant $\mathcal{G}Y$ $$\frac{\mathcal{D}Y}{P} = -\xi p_G \sum_A^P \varphi$$
= Moment statique des φ par rapport à P $\times$ distance à $\mathcal{G}Y$, direction du déplacement, de l'antipôle ϖ de P par rapport à l'ellipse E_P.
= Moment centrifuge des φ par rapport à P et à $\mathcal{G}Y$.

Suivant $\mathcal{G}X$ $$\frac{\mathcal{D}X}{P} = \eta p_G \sum_A^P \varphi$$
= Moment statique des φ par rapport à P $\times$ distance à $\mathcal{G}X$ de l'antipôle ϖ de P
= Moment centrifuge des φ par rapport à P et à $\mathcal{G}X$.



6. — Soit (f_7) un point A_0 soumis successivement aux 2 rotations :

ω_1 autour de O_1 — qui l'amène en A_1 $A_0A_1 = O_1A_0 \times \omega_1$
ω_2 autour de O_2 — qui l'amene en A_2 $A_1A_2 = O_2A_1 \times \omega_2$

Prenons, pour axe des x, O_1O_2, pour axe des y, la perpendiculaire à O_1O_2 passant par A_0

$$\delta x_0 = A_0A_1 \cos\alpha = O_1A_0 \cos\alpha \times \omega_1 = y_0\omega_1$$
$$\delta y_0 = A_0A_1 \sin\alpha = O_1A_0 \sin\alpha \times \omega_1 = X_1\omega_1$$

$$\left.\begin{aligned}\delta x_1 &= A_1A_2\cos\beta = O_2A_1 \cos\beta \times \omega_2 = y_1\omega_2 = (y_0 + \delta y_0)\,\omega_2 = y_0\omega_2\\ \delta y_1 &= A_1A_2 \sin\beta = O_2A_1 \sin\beta \times \omega_2 = (X_2 - \delta x_0)\,\omega_2 = X_2\omega_2\end{aligned}\right\}$$ en négligeant $\omega_2\delta y_0$, $\omega_2\delta x_0$

$$\Delta x_0 = \delta x_0 + \delta x_1 = y_0(\omega_1 + \omega_2)$$
$$\Delta y_0 = \delta y_0 + \delta y_1 = X_1\omega_1 + X_2\omega_2$$

Appliquons aux points O_1, O_2 des poids ω_1, ω_2. Soit O_3 leur centre de gravité. On a, (moment par rapport à O) :

$$X_3(\omega_1 + \omega_2) = X_1\omega_1 + X_2\omega_2$$

Faisons tourner A_0 de $\omega_1 + \omega_2$ autour de O_3 — Les coordonnées du déplacement sont :

$$\Delta' x_0 = y_0(\omega_1 + \omega_2) = \Delta x_0$$
$$\Delta' y_0 = X_3(\omega_1 + \omega_2) = X_1\omega_1 + X_2\omega_2 = \Delta y_0$$

Par cette rotation, A_0 vient directement en A_2.

CHAPITRE II

COMMENT, DES DÉPLACEMENTS VIRTUELS ∂x, ∂y, $\partial \theta$ DU CENTRE ÉLASTIQUE DUS A UNE FORCE **P**, ON DÉDUIT LA RÉACTION DE L'APPUI **R**^{B} QUI LES ANNULE

§ 1. — *CAS D'UNE FORCE QUELCONQUE* **P**. *LA RÉACTION* **R**^{B} *EST, PAR RAPPORT A L'ELLIPSE « ÉLASTIQUE » DE TOUT L'ARC* $\mathcal{E}$, *L'ANTIPOLAIRE DE* ϖ, *ANTIPÔLE DE LA FORCE* **P** *PAR RAPPORT A L'ELLIPSE « ÉLASTIQUE »* **E**$_P$ *DE LA PARTIE D'ARC A GAUCHE DE* **P** (f_8)

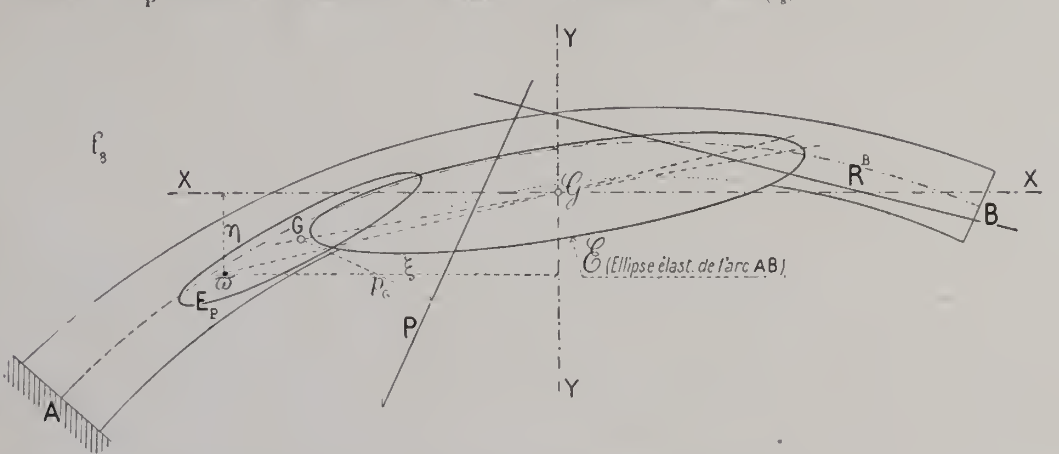
Supposons tracées :

1° l'ellipse élastique E_P de la partie d'arc à gauche de P.

2° l'ellipse élastique $\mathcal{E}$ de tout l'arc.

Soit ϖ l'antipôle de P par rapport à E_P.

P fait tourner de $Pp_G\Phi$ autour de ϖ, tout point invariablement lié à l'appui libre B.



La réaction cherchée R^B qui, elle, agit sur tout l'arc, doit produire une rotation égale et de sens contraire autour du même point ϖ ; ϖ est donc son antipôle à elle par rapport à l'ellipse élastique $\mathcal{E}$ de l'arc entier AB.

Par rapport à l'ellipse totale $\mathcal{E}$, R^B est donc l'antipolaire de ϖ, antipôle de P par rapport à l'ellipse partielle E_P.

§ 2. — *EN PRATIQUE, ON N'A A CONSIDÉRER QU'UNE FORCE VERTICALE* **V** *OU UNE HORIZONTALE* **H**

Les forces qui agissent sur un arc sont toujours supposées dans son plan de symétrie;[7] elles sont presque toutes verticales : poids mort, surcharges roulantes ; quelques-unes sont, soit horizontales : [8, 9] dilatation, freinage,[10] soit obliques : poussée d'une voûte transversale d'élégissement; celles-ci, on les décomposera en verticales et horizontales.

Je ne traiterai avec détail que le cas d'une force verticale.

7. — p. 123.

8. — Le vent est une force horizontale : mais elle n'est pas dans le plan de symétrie.

9. — La force centrifuge $\frac{PV^2}{9{,}81\ R}$ dans les ouvrages en courbe de rayon R, est normale aux rails : son effet est maximum quand la machine (maximum de P) est au milieu de la portée. On ne tient compte ni du vent, ni de la force centrifuge dans le calcul proprement dit de l'arc : mais on se rend compte de la quantité dont ils dévient les résultantes sur les sections d'appui, et dont ils augmentent les efforts.

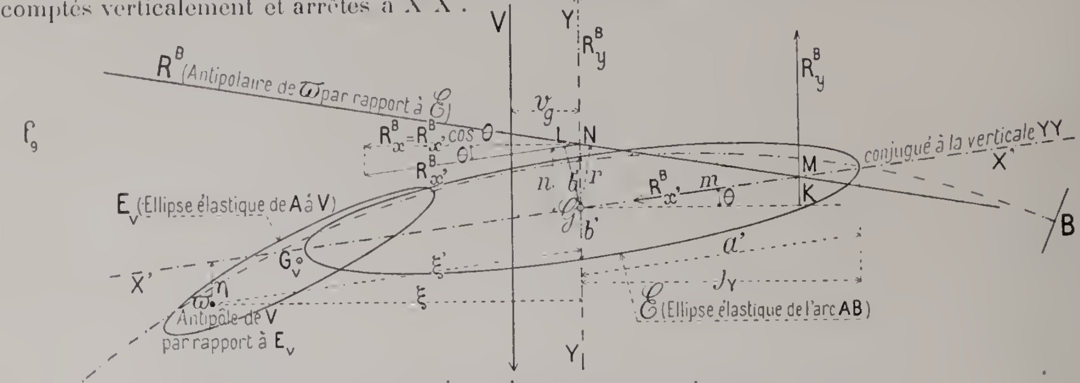
10. — On peut admettre que le frottement des roues sur les rails est le $\frac{1}{6}$ du poids freiné.

§ 3. — *CAS D'UNE FORCE VERTICALE* **V**

Art. 1. — Déplacements $\varpi_V\theta$, $\varpi_V X$, $\varpi_V Y$ du centre élastique $\mathcal{G}$ sous l'action de V.

Prenons (f_9) pour origine des coordonnées le centre élastique $\mathcal{G}$, pour axes la verticale YY de $\mathcal{G}$ et la direction X'X' conjuguée à la verticale par rapport à l'ellipse élastique de l'arc.

Les x sont comptés horizontalement, c'est-à-dire perpendiculairement à YY ; les y sont comptés verticalement et arrêtés à X'X'.



Supposons encore, mais seulement pour un instant, tracées :

l'ellipse élastique E_V de la partie de l'arc entre l'appui de gauche et la force V,

l'ellipse élastique $\mathcal{E}$ de l'arc.

Soit ϖ (ξ, η) l'antipôle de V par rapport à E_V.

Les déplacements du centre élastique $\mathcal{G}$ sous l'action d'une force 1 sont (p. 128) :

$$\frac{\varpi_V\theta}{V} = V_g \sum_A^V \varphi = \overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}_V \quad \text{Moment statique par rapport à V}$$

$$\frac{\varpi_V Y}{V} = -V_g \xi \sum_A^V \varphi = \overset{V}{\underset{A}{\text{I}}}_{VY} \quad \text{Moment centrifuge par rapport à V et Y}$$

$$\frac{\varpi_V X'}{V} = V_g \eta \sum_A^V \varphi = \overset{V}{\underset{A}{\text{I}}}_{VX'} \quad \text{Moment centrifuge par rapport à V et X'}$$

} des poids élastiques de la partie de l'arc à gauche de V

Art. 2. — Déplacements $\varpi_R\theta$, $\varpi_R X$, $\varpi_R Y$ du centre élastique $\mathcal{G}$ sous l'action de R^B.

Aux points de rencontre de R^B avec les axes YY, X'X', je décompose R^B en une composante verticale R^B_y et une composante $R^B_{x'}$, parallèle à X'X' : la projection horizontale de $R^B_{x'}$ est $R^B_x = R^B_{x'} \cos\theta$.

Le moment de R^B par rapport à $\mathcal{G}$ peut s'écrire :

$$R^B_y \times \mathcal{G}K = R^B_y\, m \cos\theta$$

$$R^B_{x'} \times \mathcal{G}L = R^B_{x'}\, n \cos\theta = n\,(R^B_{x'} \cos\theta) = R^B_x n$$

L'ellipse $\mathcal{E}$ est rapportée à 2 axes conjugués a', b'. R^B est, par rapport à elle, antipolaire de ϖ (ξ, η)

$$m\xi' = a'^2 \quad \text{ou} \quad (m \cos\theta)(\xi' \cos\theta) = a'^2 \cos^2\theta \quad \text{ou} \quad m \cos\theta\, \xi = j_Y^2 \text{ (rayon de giration)}$$

$$n\eta = b'^2.$$

Les déplacements de $\mathcal{G}$ sous l'action de R^B sont, (p. 128) :

$$\varpi_R\theta = R^B r \sum_A^B \varphi$$

$$\varpi_R X = R^B r\eta \sum_A^B \varphi = R^B_{x'} n\eta \sum_A^B \varphi = R^B_{x'} b'^2 \sum_A^B \varphi = R^B_{x'} \sum_A^B \varphi y'^2 = R^B_{x'} \overset{B}{\underset{A}{\text{I}}}_{X'^2}$$

$$\varpi_R Y = R^B r\xi \sum_A^B \varphi = R^B_y m \cos\theta\, \xi \sum_A^B \varphi = R^B_y j_Y^2 \sum_A^B \varphi = R^B_y \sum_A^B \varphi X^2 = R^B_y \overset{B}{\underset{A}{\text{I}}}_{Y^2},$$

$\overset{B}{\underset{A}{\text{I}}}_{X'^2}$ Moment d'inertie par rapport à X'
$\overset{B}{\underset{A}{\text{I}}}_{Y^2}$ Moment d'inertie par rapport à Y
} des poids élastiques de l'arc entier

Art. 3. — En égalant ces déplacements, on a R^B

Déplacements verticaux $R^B_y \overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{Y^2} = - V \overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{VY}$ (1) $\qquad R^B_y = V \dfrac{\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{VY}}{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{Y^2}}$

Déplacements horizontaux $R^B_x \overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{X'^2} = V \overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{VX'}$ (2) $\qquad R^B_x = V \dfrac{\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{VX'}}{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{X'^2}}$

Rotations $R^B r \sum_A^B \varphi = V \overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}_V$ (3)

Avec R^B_y et R^B_x, on a R^B et sa direction (f_{10}), puis avec (3), r sa distance à $\mathcal{G}$ (f_9)

Comme $R^B r = R^B_y m \cos\theta = R^B_x n$, on a aussi m et n :

$$m \cos\theta = \frac{R^B r}{R^B_y} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}_V}{\sum_A^B \varphi} \cdot \frac{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{Y^2}}{\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{VY}} \qquad\qquad n = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}_V}{\sum_A^B \varphi} \cdot \frac{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{X'^2}}{\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{VX'}}$$

On indiquera plus loin comment on construit graphiquement tous ces moments.

Dans les rapports qui donnent la direction de R^B, dans m et n ses coordonnées à l'origine, l'intensité de la force V ne figure pas : la direction et la position de la réaction ne dépendent que de la position de V : on fera toutes les constructions avec la force 1.

L'intensité de R, R_y, R_x, $R_{x'}$ est proportionnelle à celle de V.

§ 4. — *LA RÉACTION* $\mathbf{R}^B$ *PASSE PAR LE CENTRE ÉLASTIQUE* $\mathcal{G}$ (f_{11})

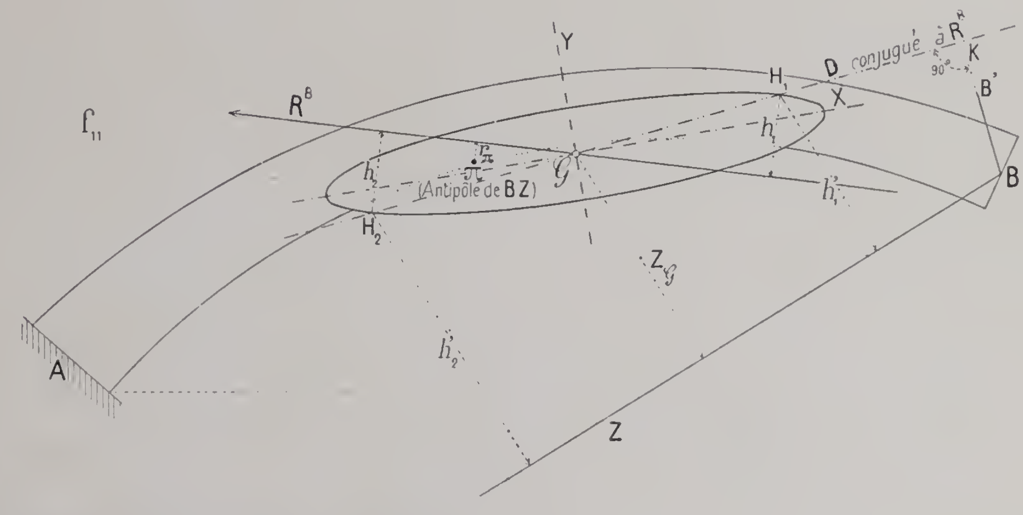
Alors son antipôle est à l'infini, sur la droite D conjuguée à R^B.

L'appui B tourne autour de ce point, c'est-à-dire se déplace normalement à D de BB'.

Ce déplacement BB' projeté sur une direction BZ est le moment centrifuge des φ par rapport à R^B et à BZ, lequel peut s'écrire :

soit[11] $R^B z_{\mathcal{G}}\ r_\pi \overset{B}{\underset{A}{\Phi}}$

soit[12] $\dfrac{R^B}{2} \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} (h_1 h'_1 + h_2 h'_2)$



Réciproquement, si B subit une translation BB', l'antipôle de R^B est à l'infini sur un diamètre D perpendiculaire à BB' ; R^B passe par le centre élastique et est conjuguée à ce diamètre.

Si R^B coïncide avec un axe de l'ellipse élastique, par exemple $\mathcal{G}$X, B se déplace normalement au conjugué de $\mathcal{G}$X qui est l'autre axe $\mathcal{G}$Y, c'est-à-dire parallèlement à $\mathcal{G}$X.

Réciproquement, si l'appui B se déplace parallèlement à un axe de l'ellipse élastique, R^B agit suivant cet axe. Un changement de température déplace horizontalement l'appui d'un arc symétrique ; la réaction correspondante passe par le centre élastique et est horizontale.

11. — Théorème de Culmann p. 122.
12. — p. 121.

TITRE III

ARC DISSYMÉTRIQUE

COMMENT, EN PRATIQUE, ON CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS

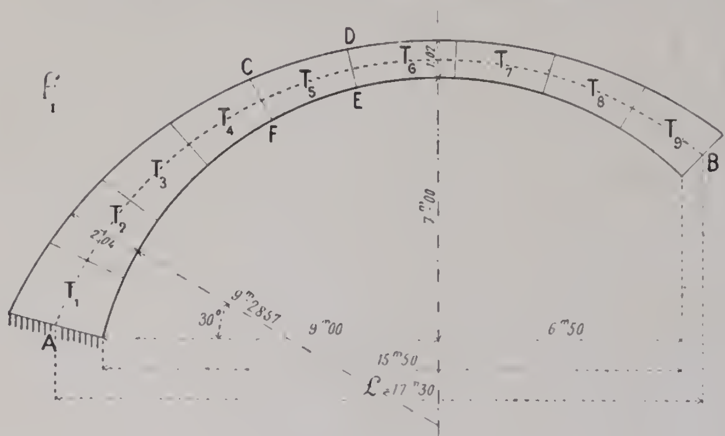
CHAPITRE I

MOMENTS STATIQUES, MOMENTS D'INERTIE, MOMENTS CENTRIFUGES DES POIDS ÉLASTIQUES FUNICULAIRES 1 A 5 (Pl. I)

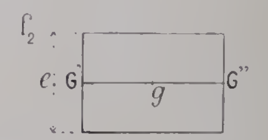
§. 1. — *CENTRE ÉLASTIQUE DIAMÈTRE DE L'ELLIPSE ÉLASTIQUE DE L'ARC CONJUGUÉ A LA VERTICALE*

Art. 1. — Division de l'arc en tranches T_1, T_2, ... (f_1).

On divise l'arc AB en tranches assez minces pour que l'on puisse supposer rectangulaire leur face (par exemple CDEF), et, constant, le moment d'inertie I de leur section transversale, supposée elle aussi rectangulaire (f_2).



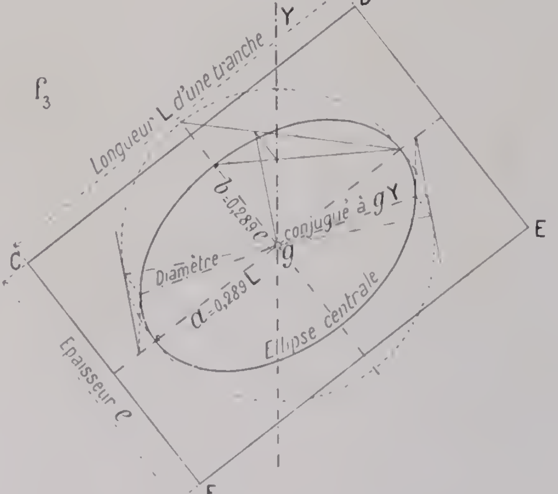
$$I = \frac{1}{12} e^3 \times G'G''$$



L'épure (Pl. I) est faite pour un arc dont les dimensions sont indiquées par f_1.

Art. 2. — Ellipse centrale d'inertie d'une tranche (f_3).

A. — Axes.



$$\begin{cases} a = \dfrac{L}{\sqrt{12}} = 0.289\ L \\ b = \dfrac{e}{\sqrt{12}} = 0.289\ e \end{cases}$$

Dans la pratique on ne trace pas l'ellipse.

B. — Diamètre conjugué à la verticale. (f_3).

On considère l'ellipse a, b, comme la projection du cercle de rayon a : on trace les tangentes au cercle a dont les projections sont verticales ; on détermine les points de tangence, on les joint.

Ce diamètre est le lieu des antipôles des verticales par rapport à l'ellipse (f_4)

$$\overline{gM'}^2 = \overline{gM}^2 = gT_1 \times gK_1 = gT_2 \times gK_2 = \ldots\ldots$$

Art. 3. — Poids élastique φ d'une tranche.

$$\varphi = \frac{\text{L (Longueur de la fibre moyenne)}}{\text{E (Coefficient d'élasticité)} \times \text{I} \left(\substack{\text{Moment d'inertie de la} \\ \text{section transversale}}\right)}$$

On ne connaît pas E pour tous les points de l'arc ; on le supposera constant et égal à 1.[1] Au demeurant, dans les formules des réactions, il est au numérateur et au dénominateur.

On prendra donc $\varphi = \dfrac{L}{I}$

TABLEAU I. — *Arc de la Pl. I. — Largeur G' G'' (f_2) = 1^m. — Axes des ellipses centrales des tranches. Leurs poids élastiques.*

Nos des tranches	Longueur de la tranche L	Épaisseur de la voûte au droit des centres de gravité g e	Demi-axes de l'ellipse centrale de la tranche $a = 0.289\,L$	$b = 0.289\,e$	Moment d'inertie de la section transversale de l'arc $I = \frac{1}{12}e^3$	Poids élastique de la tranche $\varphi = \frac{L}{I}$
1	2	3	4	5	6	7
1	1m82	2m42	0m526	0m699	1.181041	1.541
2	2.01	2.06	0.580	0.595	0.728485	2.759
3	2.19	1.70	0.633	0.491	0.409417	5.349
4	2.37	1.39	0.685	0.402	0.223802	10.589
5	2.55	1.16	0.737	0.335	0.130075	19.604
6	2.75	1.03	0.795	0.298	0.091061	30.199
7	2.54	1.05	0.734	0.303	0.096469	26.329
8	2.39	1.19	0.691	0.343	0.140430	17.019
9	2.34	1.44	0.676	0.416	0.248832	9.403
					$\sum_A^B \varphi =$	122.792

L'épure (Pl. I) a été faite à l'échelle de 0m05 pour 1m puis réduite à celle de 0m01 pour 1m.

Art. 4. — Centre élastique $\mathcal{G}$ de l'arc (Centre de gravité des poids élastiques φ appliqués aux centres de gravité des tranches $g_1, g_2, \ldots$)

A. — Verticale de $\mathcal{G}$. Funiculaire **1**.

Suspendons verticalement les φ aux centres $g_1 g_2 \ldots$: traçons pour ces φ le polygone des forces de pôle O' avec une distance polaire p' : (on a pris $p' = \mathcal{L} = 17^m30$ (f_1) $= \Sigma\varphi$: c'est-à-dire que $\varphi = 1$ est représenté par $\dfrac{17^m30}{122.792} = 0^m14089$), puis le funiculaire **1** (Pl. I).

Les côtés extrêmes de **1** se coupent sur la verticale de $\mathcal{G}$.

Prolongeons les côtés de **1**. Ils interceptent sur toute verticale des longueurs qui sont, divisés par p', les moments statiquent des φ par rapport à cette verticale.

1. — Pour E dans les voûtes, voir III, p. 372 à 374, 380 à 382.

Par exemple, si elle est YY :

$$\gamma_1 = \frac{\varphi_1 x_1}{p'} \qquad \gamma_2 = \frac{\varphi_2 x_2}{p'} \qquad \ldots\ldots$$

Si c'est V_7

$$\gamma_1^{V_7} = \frac{\varphi_1 \, \mathcal{D}^{ce}(g_1 V_7)}{p'} \qquad \gamma_2^{V_7} = \frac{\varphi_2 \, \mathcal{D}^{ce}(g_2 V_7)}{p'}$$

La somme $\gamma_1^{V_7} + \gamma_2^{V_7} + \ldots\ldots = \Gamma_A^{V_7}$ est, divisée par p', la somme des moments statiques par rapport à V_7 des φ de A à V_7.

B. — Horizontale de $\mathcal{G}$.

Attachons horizontalement les φ aux centres $g_1, g_2 \ldots\ldots$ Traçons pour ces φ le funiculaire auxiliaire 2α à côtés perpendiculaires aux rayons de O'.

Ses côtés extrêmes se coupent en G' sur l'horizontale de $\mathcal{G}$.

C. — Vérification par le calcul de la position de $\mathcal{G}$.

Afin d'éviter les erreurs — surtout les erreurs d'échelle — il convient de vérifier par le calcul la position de $\mathcal{G}$.

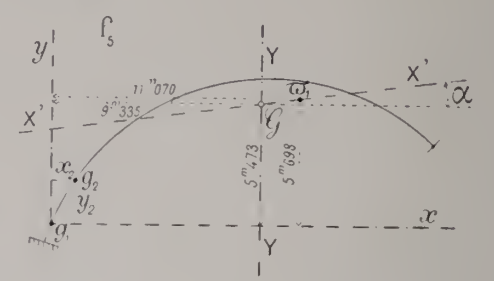


TABLEAU II. — *Moments des φ par rapport à la verticale et à l'horizontale de g_1 (f_5).*

Nos des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 7)	Distances des g mesurées sur une épure à l'échelle de 0m05 p. m.		Moments des φ			
				1er degré		2e degré	
		à la verticale de g_1	à l'horizontale de g_1				
	φ	x	y	φx	φy	φx^2	$\varphi x y$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.541	0	0	0	0	0	0
2	2.759	0m97	1m65	2.676	4.552	2.596	4.415
3	5.349	2.325	3.24	12.436	17.330	28.914	40.293
4	10.589	4.12	4.65	43.627	49.239	179.743	202.866
5	19.604	6.325	5.71	123.995	111.939	784.268	708.011
6	30.199	8.925	6.27	269.526	189.348	2405.520	1689.928
7	26.329	11.585	6.20	305.021	163.240	3533.668	1891.130
8	17.019	13.98	5.56	237.925	94.626	3326.192	1322.863
9	9.403	16.07	4.45	151.107	41.843	2428.289	672.426
	122.792			1146.313	672.117	12689.190	6531.932
	$\sum_A^B \varphi$			$\Sigma \varphi x$	$\Sigma \varphi y$	$\Sigma \varphi x^2$	$\Sigma \varphi x y$

$$x_{\mathcal{G}} \text{ (distance entre les verticales de } g_1 \text{ et de } \mathcal{G}) = \frac{\Sigma \varphi x \text{ (col. 5)}}{\Sigma \varphi \text{ (col 2)}} = \frac{1146.313}{122.792} = 9^m335$$

$$y_{\mathcal{G}} \text{ (distance entre les horizontales de } g_1 \text{ et de } \mathcal{G}) = \frac{\Sigma \varphi y \text{ (col. 6)}}{\Sigma \varphi x \text{ (col 2)}} = \frac{672.117}{122.792} = 5^m473$$

$\mathcal{G}$ est à 9m335 à droite de g_1, à 5m473 au-dessus. La construction graphique est exacte.

Art. 5. — Diamètre de l'ellipse élastique de l'arc conjugué à la verticale. Axe X'X'.

Dans tout ce qui va suivre, on continuera à compter les x horizontalement, c'est-à-dire perpendiculairement à l'axe vertical YY (f_5), mais les y comptés verticalement seront arrêtés à un axe X'X' conjugué à YY.

Déterminons X'X'.

C'est le lieu, par rapport à l'ellipse élastique de l'arc, des antipôles des verticales.

Il passe par le centre $\mathcal{G}$ qu'on vient de déterminer et par l'antipôle d'une verticale quelconque.

On peut le trouver par une construction graphique ; elle est longue.

Avec les nombres du Tableau II, on a tout de suite ϖ_1 antipôle de la verticale de g_1 (f_5).

$$x_{\varpi_1} \text{ (distance entre les verticales de } \varpi_1 \text{ et de } g_1) = \frac{\Sigma \varphi x^2 \text{ (Tableau II col 7)}}{x_{\mathcal{G}} (= 9^{m}335) \times \Sigma\varphi \text{ (Tableau I col 7)}} = \frac{12689.190}{9.335 \times 122.792} = 11^{m}070$$

$$y_{\varpi_1} \text{ (distance entre les horizontales de } \varpi_1 \text{ et de } g_1) = \frac{\Sigma \varphi x y \text{ (Tableau II col 8)}}{x_{\mathcal{G}} (= 9^{m}335) \times \Sigma\varphi \text{ (Tableau I col 7)}} = \frac{6531.932}{9.335 \times 122.792} = 5^{m}698$$

$$\text{tang}\ \alpha = \frac{y_{\varpi_1} - y_{\mathcal{G}}}{x_{\varpi_1} - x_{\mathcal{G}}} = \frac{5^{m}698 - 5^{m}473}{11^{m}070 - 9^{m}335} = 0.130$$

§ 2. — *MOMENTS D'INERTIE DES* φ *PAR RAPPORT A L'AXE VERTICAL* $\mathcal{G}$Y *ET A SON CONJUGUÉ* $\mathcal{G}$X'. *LONGUEURS SUIVANT* $\mathcal{G}$Y *ET* $\mathcal{G}$X' *DES DIAMÈTRES DE L'ELLIPSE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Moment d'inertie des φ par rapport à la verticale YY du centre élastique.

A. — Construction graphique. Funiculaire **3**.

Déterminons les antipôles π^Y (ξ^Y, η^Y) de YY par rapport aux ellipses centrales des tranches Suspendons-y verticalement les longueurs

$$\gamma_1 = \frac{\varphi_1 x_1}{p'} \quad , \quad \gamma_2 = \frac{\varphi_2 x_2}{p'} \quad , \; .....$$

interceptées sur YY par les côtés prolongés du funiculaire **1** (p. 133 Art 4-A).

Construisons le polygone des forces de pôle O''' placé sur le dernier côté de **1**, de distance polaire p''' (on a pris $p''' = \frac{\mathcal{L}}{8} = 2^{m}1625 = \frac{\Sigma\varphi}{8}$ (p. 133 Art 4-A) puis le funiculaire **3**.

3 est en S : ses côtés extrêmes sont parallèles.

Soient λ_1, λ_2 ..... les longueurs interceptées sur l'axe YY par les côtés prolongés de **3** :

$$\lambda_1 = \frac{\gamma_1 \xi_1}{p'''} = \frac{\varphi_1 x_1 \xi_1}{p' p'''} , \qquad \lambda_2 = \frac{\varphi_2 x_2 \xi_2}{p' p'''} , \; .....$$

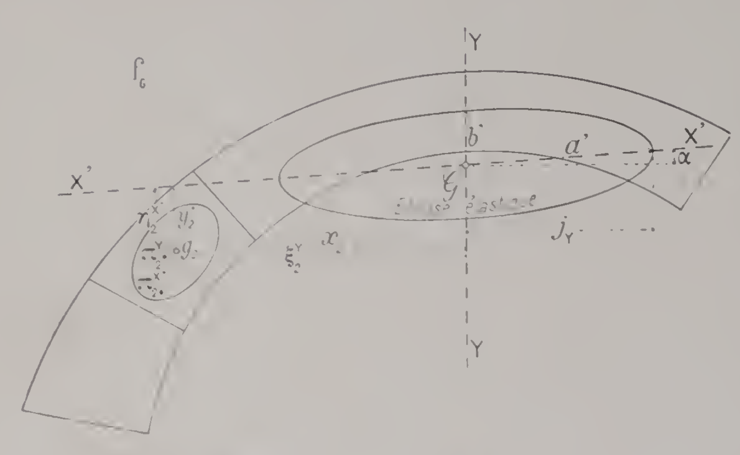
$\varphi_1 x_1 \xi_1$ produit du poids élastique φ_1 par x_1, distance du centre de gravité à l'axe YY et par ξ_1, distance au même axe de son antipôle, est le moment d'inertie de φ_1 par rapport à YY.

La somme $\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots\ldots = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$, est donc, divisé par $p' p'''$, le moment d'inertie I_{Y^2} des poids élastiques de tout l'arc par rapport à YY

$$I_{Y^2} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\, p' p'''.$$

B. — Vérification par le calcul.

TABLEAU III. — *Calcul de* I_{Y^2} *et de* $\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$, *distance verticale entre les côtés extrêmes du funiculaire* **3** ($\mathfrak{f}_6$).



Nos des tranches	Poids élastiques (Tableau 1 col 7) φ	Distance horizontale à YY mesurée sur l'épure à l'échelle de 0m05 par m. — des centres de gravité g x	des antipôles π^Y ξ^Y	Produits $\varphi x \xi^Y$
1	2	3	4	5
1	1.541	9m32	9m37	134.573
2	2.759	8.36	8.40	193.748
3	5.349	7.00	7.05	263.973
4	10.589	5.20	5.30	291.833
5	19.604	3.01	3.18	187.646
6	30.199	0.41	1.96	24.268
7	26.329	2.24	2.48	146.263
8	17.019	4.64	4.72	372.730
9	9.403	6.72	6.77	427.784
$\sum_A^B \varphi =$	122.792	$I_{Y^2} = \sum_A^B \varphi x \xi^Y =$		2042.818

sur l'épure : $p' = \mathcal{L} = 17^m30$

$$p''' = 2^m1625$$

$$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\left(\begin{array}{c}\text{mesuré}\\\text{sur}\\\text{l'épure}\end{array}\right) = \frac{2042.818\ (\text{col. } 5)}{17.3 \times 2.1625} \times 0.141\ (\varphi = 1\ \text{p. } 133)$$

$$= 7^m70$$

La construction graphique est exacte.

Art. 2. — Moment d'inertie des φ par rapport à X'X'.

Les y sont arrêtés à X'X' ($\mathfrak{f}_6$). $I_{X'^2} = \Sigma \varphi y'^2$.

Disposons les poids élastiques φ sur une parallèle à X'X'.

A. — Construction graphique. Funiculaire **4**.

Construisons un polygone des forces de pôle O'', de distance polaire $p'' = \dfrac{\mathcal{L}}{6}$, comptée verticalement, puis le funiculaire **2**.

Ses côtés prolongés découpent sur X'X' des longueurs

$$\nu_1 = \frac{\varphi_1 y'_1}{p''}, \qquad \nu_2 = \frac{\varphi_2 y'_2}{p''} \quad \ldots\ldots$$

Déterminons les antipôles $\pi^{X'}$ ($\xi^{X'}$, $\eta^{X'}$) de X'X' par rapport aux ellipses centrales des tranches.

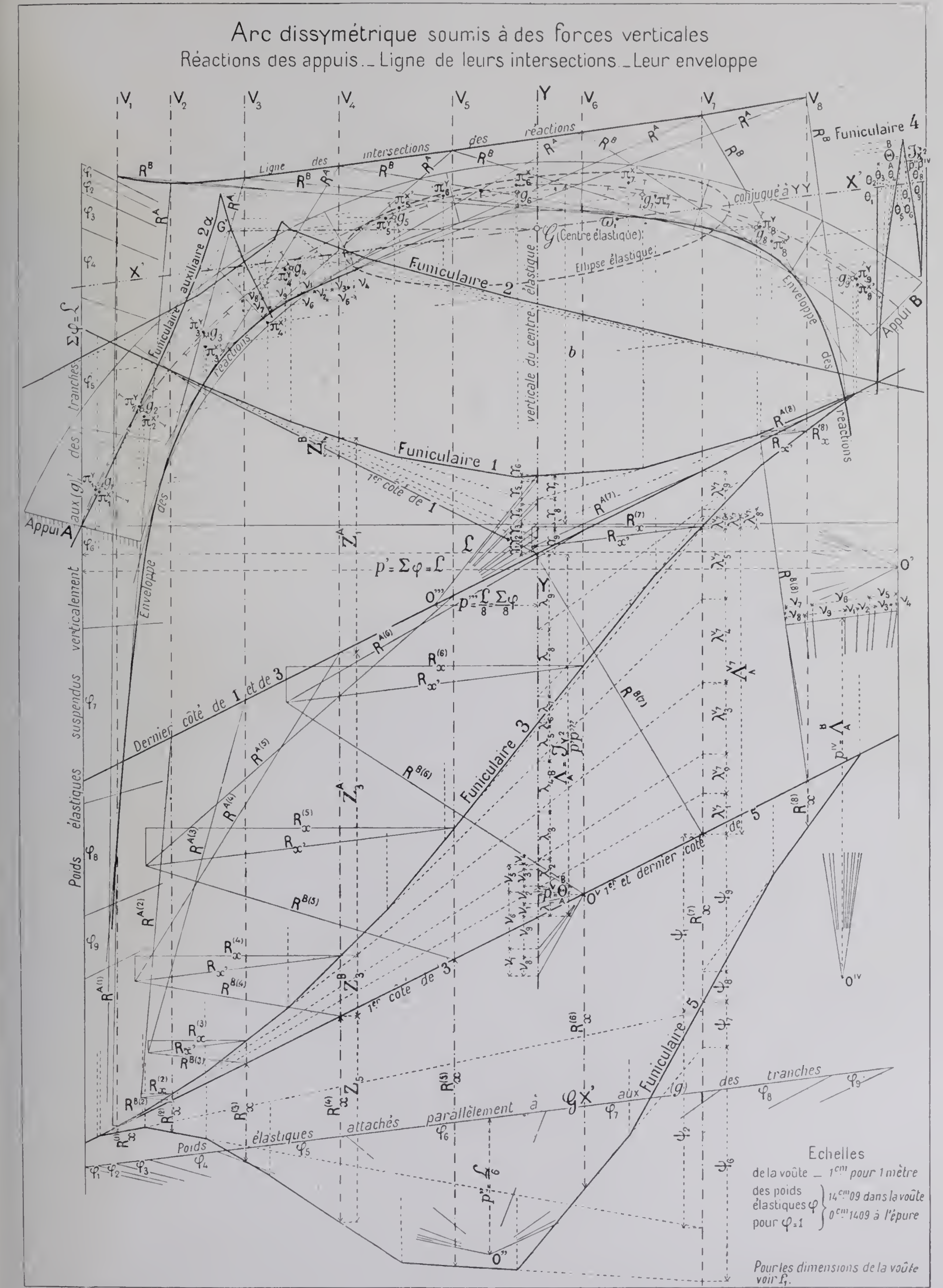
Attachons-y parallèlement à X'X' les longueurs $\nu_1 \nu_2 \ldots\ldots$

Construisons le polygone des forces O^{IV}, de distance polaire p^{IV} (comptée verticalement), puis le funiculaire **4**.

Les côtés extrêmes de **4** sont parallèles.

Soient $\theta_1 . \theta_2 , \ldots\ldots$ les segments découpés sur X'X', par les côtés prolongés de **4**.

$$\theta_1 = \frac{\nu_1 \eta'_1}{p^{IV}} = \frac{\varphi_1 y'_1 \eta'_1}{p'' p^{IV}}, \qquad \theta_2 = \frac{\varphi_2 y'_2 \eta'_2}{p'' p^{IV}} \ldots\ldots$$


Arc dissymétrique soumis à des forces verticales
Réactions des appuis._ Ligne de leurs intersections._Leur enveloppe
Ligne des intersections des réactions
Funiculaire 4
conjugué à YY
Centre élastique
Ellipse élastique
Funiculaire 2
Funiculaire auxiliaire 2α
Enveloppe des réactions
verticale du centre élastique
Funiculaire 1
1er côté de 1
Appui A
Appui B
Poids élastiques suspendus verticalement aux (g) des tranches
Dernier côté de 1 et de 3
Funiculaire 3
1er et dernier côté de 5
1er côté de 3
Funiculaire 5
Poids élastiques attachés parallèlement à X' aux (g) des tranches
Echelles
de la voûte _ 1cm pour 1 mètre
des poids élastiques φ pour φ=1
14cm09 dans la voûte
0cm1409 à l'épure
Pour les dimensions de la voûte voir f1.

$\varphi_1 y'_1 \eta'_1$ est le moment d'inertie de φ_1 par rapport à X'X'.

La somme $\theta_1 + \theta_2 + \dots = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$ est donc, divisé par $p''p^{IV}$, le moment d'inertie $I_{X'^2}$ des poids élastiques de tout l'arc par rapport à X'X'.

$$I_{X'^2} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} \, p''p^{IV}$$

Tableau IV. — *Calcul de* $I_{X'^2}$ *et de* $\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$ *distance, suivant X'X', entre les côtés extrêmes du funiculaire* **4** (f_6).

B. — Vérification par le calcul.

sur l'épure $p'' = 2^m883$

$p^{IV} = 7^m700$

$$\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}\left(\begin{smallmatrix}\text{mesuré}\\ \text{sur}\\ \text{l'épure}\end{smallmatrix}\right) = \frac{150.004\,(\text{col.}5)}{2.883 \times 7.700} \times 0.141 \;(\varphi = 1 \text{ p. } 133)$$

$$= 0^m953$$

La construction graphique est exacte.

Nos des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 7)	Distance verticale à X'X' mesurée sur l'épure à l'échelle de 0m05 par m.		Produits
		des centres de gravité g	des antipôles $\pi^{X'}$	
	φ	y'	$\eta'^{X'}$	$\varphi y' \eta'^{X'}$
1	2	3	4	5
1	1.541	4^m30	4^m40	29.155
2	2.759	2.78	2.90	22.333
3	5.349	1.38	1.58	11.663
4	10.589	0.19	1.28	2.575
5	19.604	0.60	0.82	9.645
6	30.199	0.84	0.95	24.099
7	26.329	0.45	0.74	8.768
8	17.019	0.48	0.90	7.352
9	9.403	1.83	2.00	34.414
	$\sum_A^B \varphi = 122.792$	$I_{X'^2} = \sum_A^B \varphi y' \eta'^{X'} = 150.004$		

En pratique on ne trace pas l'ellipse élastique ; si, pour plus de clarté on la veut tracer, on a ainsi ses axes conjugués :

Art. 3. — Longueur des 2 axes conjugués de l'ellipse élastique : *a'* **suivant X'X',** *b'* **suivant YY.**

$$I_{Y^2} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \,(\text{funiculaire } \mathbf{3})\, p'p''' = j_Y^2 \sum_A^B \varphi = a'^2 \cos^2\alpha \sum_A^B \varphi \qquad a' = 4^m112$$

$$I_{X'^2} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} \,(\text{funiculaire } \mathbf{4})\, p''p^{IV} = b'^2 \sum_A^B \varphi \qquad b' = 1^m105$$

§ 3. — *MOMENTS CENTRIFUGES DES φ PAR RAPPORT : D'UNE PART A UN AXE ($\mathcal{G}$Y, OU $\mathcal{G}$X') D'AUTRE PART A UNE FORCE VERTICALE.*

Art. 1. — Par rapport à YY et à une autre verticale (par exemple V_7).

Prolongeons jusqu'à V_7 les côtés de **3**.

Soient $\lambda_1^{V_7}$, $\lambda_2^{V_7}$, ... les segments interceptés

$$\lambda_1^{V_7} = \frac{\varphi_1 \xi_1 \,\text{Œ}^{ce}(g_1 V_7)}{p'p'''}, \qquad \lambda_2^{V_7} = \frac{\varphi_2 \xi_2 \,\text{Œ}^{ce}(g_2 V_7)}{p'p'''}, \dots$$

Ce sont, divisés par $p'p'''$, les moments centrifuges des φ par rapport à $\mathcal{G}$Y et à V_7.

La somme $\lambda_1^{V_7} + \lambda_2^{V_7} + \dots = \overset{V_7}{\underset{A}{\Lambda}}$ est, divisée par $p'p'''$, la somme des moments centrifuges, par rapport à YY et V_7, des φ de A à V_7.

Art. 2. — Par rapport à X'X' et à la verticale V_7. Funiculaire 5.

Appliquons verticalement aux antipôles $\pi_1^{X'}$ .... de X'X' les moments $\nu_1 = \frac{\varphi_1 y'_1}{p''}$, $\nu_2 = \frac{\varphi_2 y'_2}{p''}$, ... (funiculaire **2**).

Plaçons les ν sur YY à partir du premier côté de **3** ; plaçons sur ce côté un pôle O^V, et construisons un polygone des forces de distance polaire p^V, puis le funiculaire **5**.

Les côtés prolongés de **5** interceptent sur V_7 les segments

$$\psi_1 = \nu_1 \frac{\mathcal{D}^{ce}(\pi_1^{X'} V_7)}{p^V} = \frac{\varphi_1 y'_1 \mathcal{D}^{ce}(\pi_1^{X'} V_7)}{p'' p^V}, \qquad \psi_2 = \frac{\varphi_2 y'_2 \mathcal{D}^{ce}(\pi_2^{X'} V_7)}{p'' p^V}, \ldots .$$ [2]

Ce sont, divisés par $p'' p^V$, les moments centrifuges des φ par rapport à X'X' et à la verticale V_7.

CHAPITRE II

COMMENT A L'AIDE DES FUNICULAIRES 1 A 5 ON CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS DUES A DES FORCES VERTICALES

§. 1. — *DANS LES FORMULES* p. 131 *REMPLACER LES MOMENTS PAR DES LONGUEURS PRISES SUR LES FUNICULAIRES* **1, 3, 5.**

Art. 1. — Formules générales.

1° Réaction de l'appui de droite R^B.

$$\frac{R_y^B}{V} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{I}}_{VY}}{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{Y^2}} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Lambda}} p' p'''}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} p' p'''} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Lambda}}}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}$$

$$\frac{R_x^B}{V} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{I}}_{VX'}}{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'^2}} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Psi}} p'' p^V}{\overset{B}{\underset{A}{\Theta}} p'' p^{IV}} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Psi}} p^V}{\overset{B}{\underset{A}{\Theta}} p^{IV}}$$

$$\frac{R_y}{R_x} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Lambda}}}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} \frac{\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}}{\overset{V}{\underset{A}{\Psi}}} \frac{p^{IV}}{p^V}$$

$$\frac{R^B r_B}{V} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}(V)}{\sum\limits_A^B \varphi} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Gamma}} p'}{\sum\limits_A^B \varphi}$$

$$m \cos \theta = \frac{R^B r_B}{R_y^B} \qquad n = \frac{R^B r_B}{R_x^B}$$

2° Réaction de l'appui de gauche R^A.

Pour R^B, on a mesuré les ordonnées entre les funiculaires **1, 3, 5** et leur 1er côté (côté extrême de gauche) prolongé ; pour R^A, on les mesurera entre les polygones et leur dernier côté (côté extrême de droite).

2. — ψ_3, ψ_4 et ψ_5 sont en dehors de l'épure Pl. I.

Art. 2. — Choix de distances polaires pour simplifier formules et constructions.

On adoptera $p' = \sum_{A}^{B} \rho$.[3]

Avec M. Guidi,[4] j'ai pris $p^{IV} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$, $p^{V} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$; p'' et p''' qui disparaissent des formules peuvent être prises arbitrairement.[5]

Réactions de l'appui.

		de droite R^B	de gauche R^A
Moment	$\frac{Rr}{V} =$	$\overset{V}{\underset{A}{\Gamma}} = Z_1^B$ (Ordonnée entre le funiculaire 1 et son 1er côté (gauche).)	$\overset{B}{\underset{V}{\Gamma}} = Z_1^A$ (Ordonnée entre le funiculaire 1 et son dernier côté (droite).)
Composante verticale	$\frac{R_y}{V} =$	$\frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} \overset{V}{\underset{A}{\Lambda}} = \frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} Z_3^B$ (Ordonnée entre le funiculaire 3 et son 1er côté.)	$\frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} \overset{B}{\underset{V}{\Lambda}} = \frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} Z_3^A$ (Ordonnée entre le funiculaire 3 et son dernier côté.)
Composante horizontale	$\frac{R_x}{V} =$	$\frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} \overset{V}{\underset{A}{\Psi}} \left(= \overset{B}{\underset{V}{\Psi}} \right) = \frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} Z_5$ (Ordonnée entre le funiculaire 5 et ses côtés extrêmes, qui se confondent.)	
Distances à $\mathcal{G}$ (Coordonnées à l'origine) — suivant $\mathcal{G}$X	$m \cos \theta =$	$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \frac{Z_1^B}{Z_3^B}$	$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \frac{Z_1^A}{Z_3^A}$
suivant $\mathcal{G}$Y	$n =$	$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \frac{Z_1^B}{Z_5}$	$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \frac{Z_1^A}{Z_5}$

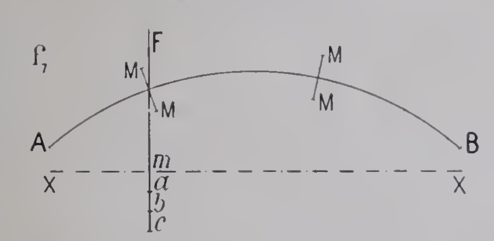
Ainsi les funiculaires **1, 3, 5,** sont des lignes d'influence[6] : **1** du moment Rr par rapport au centre élastique, **3** de la composante verticale, **5** de la composante horizontale de la réaction de chaque appui due à une force verticale V.

3. — A l'épure (Pl. I), l'échelle des ρ est telle que $\sum_{A}^{B} \rho = \mathcal{L}$ (portée de la fibre moyenne).

4. — *L'Arco elastico senza cerniere* — Académie des Sciences de Turin, 1902.

5. — A la Pl. I ; $p'' = \frac{\sum_{A}^{B} \rho}{6} = \frac{\mathcal{L}}{6}$ $\qquad p''' = \frac{\sum_{A}^{B} \rho}{8} = \frac{\mathcal{L}}{8}$

6. — J'en rappelle la définition.
Sur un arc AB agissent des charges fixes (poids mort), des charges roulantes.....
Considérons l'une d'elles F (f_7).



Sur une section MM, elle produit : un moment de flexion, — une poussée horizontale, — un certain effort par $0^m\overline{01}^2$ à l'intrados, à l'extrados, — un déplacement du centre de gravité.....

Représentons sur la ligne d'action de F chacune de ces quantités par des longueurs comptées à partir d'un axe XX : *ma*, *mb*, *mc*.

Puis faisons avancer la charge F d'un appui à l'autre, par exemple de A à B.

Les lieux des points *a*, *b*, *c*.. . sont les « lignes d'influence » du moment, de la poussée horizontale, du travail par $0^m\overline{01}^2$, du déplacement vertical du centre de gravité..... relatifs à la section MM.

Chaque section a ses lignes d'influence.

Supposons qu'on les ait tracées pour la force 1 : pour une force de N^{Tonnes}, toutes les ordonnées seront multipliées par N ; pour une section, une même ligne d'influence servira pour chaque charge et chaque surcharge.

Si plusieurs charges ou plusieurs surcharges agissent ensemble, on ajoute leurs ordonnées.

Art. 3. — Comment on construit les réactions R^B, R^A.

On a successivement (Pl. I), par **5**, R_x puis $R_{x'}$; par **3**. R^B_y, puis R^B; R^A_y, puis R^A.

Pour avoir la ligne d'action de R^B, on détermine sa distance à $\mathcal{G}$.

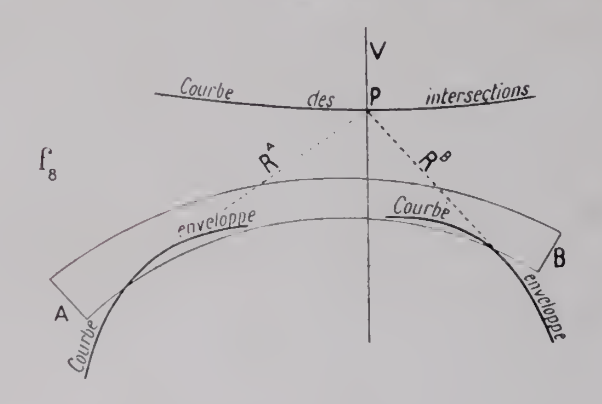
$$\mathfrak{M} = R^B r_B \qquad \text{d'où } r_B$$

Autour de $\mathcal{G}$, décrivons un arc de rayon r_B et menons une tangente parallèle à R^B.

R^A en place passe par le point de rencontre de V et de R^B et est parallèle à R^A qu'on a construite. Comme vérification, on place R^A.

Pour une charge V près d'un appui, les réactions sont assez mal déterminées : une erreur sur elles change peu les efforts ; si cependant on les voulait exactes, on déterminerait l'antipôle ϖ de V pour l'ellipse élastique entre l'autre appui et V, puis l'antipolaire de ϖ par rapport à l'ellipse élastique totale.

§ 2. — *COURBE DES INTERSECTIONS ET COURBE ENVELOPPE DES RÉACTIONS*



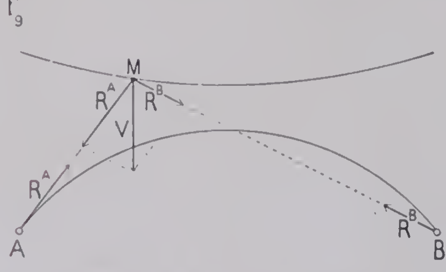
Les deux réactions R^A, R^B d'une force V = 1 se coupent en un point P de la ligne d'action de V (f_8).

Déplaçons V de A à B et traçons pour chaque position de V ses deux réactions. On obtient deux courbes ; celle des intersections des réactions et leur enveloppe.[7]

Par elles, on a immédiatement les réactions dues à une force verticale quelconque V (f_8).

Du point de rencontre P de V, avec la courbe des intersections, on mène les deux tangentes à la courbe enveloppe.[8]

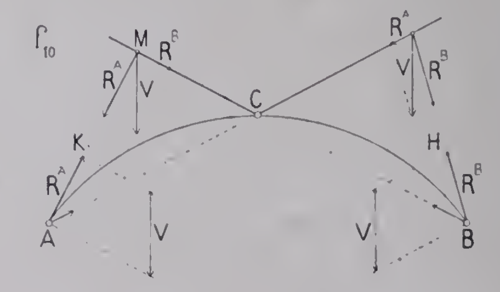
7. — Ces deux courbes ont été indiquées par E. Winkler, Professeur à l'École Polytechnique de Prague « *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit* ». Prague 1867, p. 328 et suivantes.



8. — S'il y a aux reins deux articulations A, B (f_9), les deux réactions d'une charge V passent par A et B ; l'enveloppe de R^A, R^B est réduite aux points A et B.

S'il y a trois articulations A, B, C, (f_{10}), l'enveloppe de R^A, R^B demeure réduite aux points A et B ; la ligne des intersections est : à droite de C, AC prolongée — à gauche de C, BC prolongée.

Pour un même V, le lieu du point K extrémité des réactions R^A, est une parallèle à BC, à V au-dessus de celle menée par A — de même, le lieu de H est une parallèle à AC, à V au-dessus de celle menée par B.



Ces courbes tracées avec V = 1 ne dépendent pas de l'intensité de V, mais seulement des propriétés élastiques de l'arc.

On n'en a pas besoin pour tracer les lignes d'influence, mais elles sont fort utiles, et comme contrôle, et parce qu'elles permettent de trouver de suite les réactions dues à une charge, de délimiter les zônes à efforts > 0, < 0,.....

CHAPITRE III

CALCUL, A L'AIDE DES LIGNES D'INFLUENCE, DES EFFORTS EN KG $/\overline{0^m01}^2$ A L'INTRADOS β_i ET A L'EXTRADOS β_e, D'UNE SECTION QUELCONQUE MM, SOUS L'ACTION D'UNE FORCE 1.

Art. 1. — **Expression de β_i et β_e en fonction de la poussée horizontale H et des distances verticales h_e, h_i de m_e, m_i, limites du noyau central, à la résultante R des actions sur MM.** (f_{11})

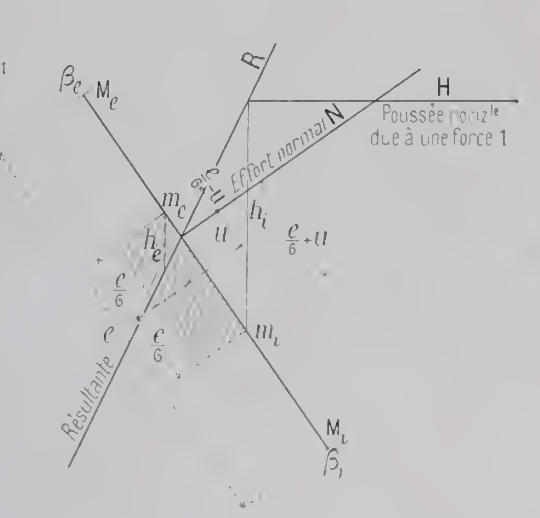
$$\beta_i = \frac{N}{el}\left(1 - \frac{6u}{e}\right) = \frac{N}{\frac{1}{6}e^2 l}\left(\frac{e}{6} - u\right)$$

$$\beta_e = \frac{N}{el}\left(1 + \frac{6u}{e}\right) = \frac{N}{\frac{1}{6}e^2 l}\left(\frac{e}{6} + u\right)$$

$$\mathfrak{M}_e\left(\begin{array}{c}\text{moment de R}\\ \text{par rapport à } m_e\end{array}\right) = N\left(\frac{e}{6} - u\right) = H\left(\begin{array}{c}\text{poussée}\\ \text{horizontale}\end{array}\right) h_e$$

$$\mathfrak{M}_i\left(\begin{array}{c}\text{moment de R}\\ \text{par rapport à } m_i\end{array}\right) = N\left(\frac{e}{6} + u\right) = H\, h_i$$

f_{11}



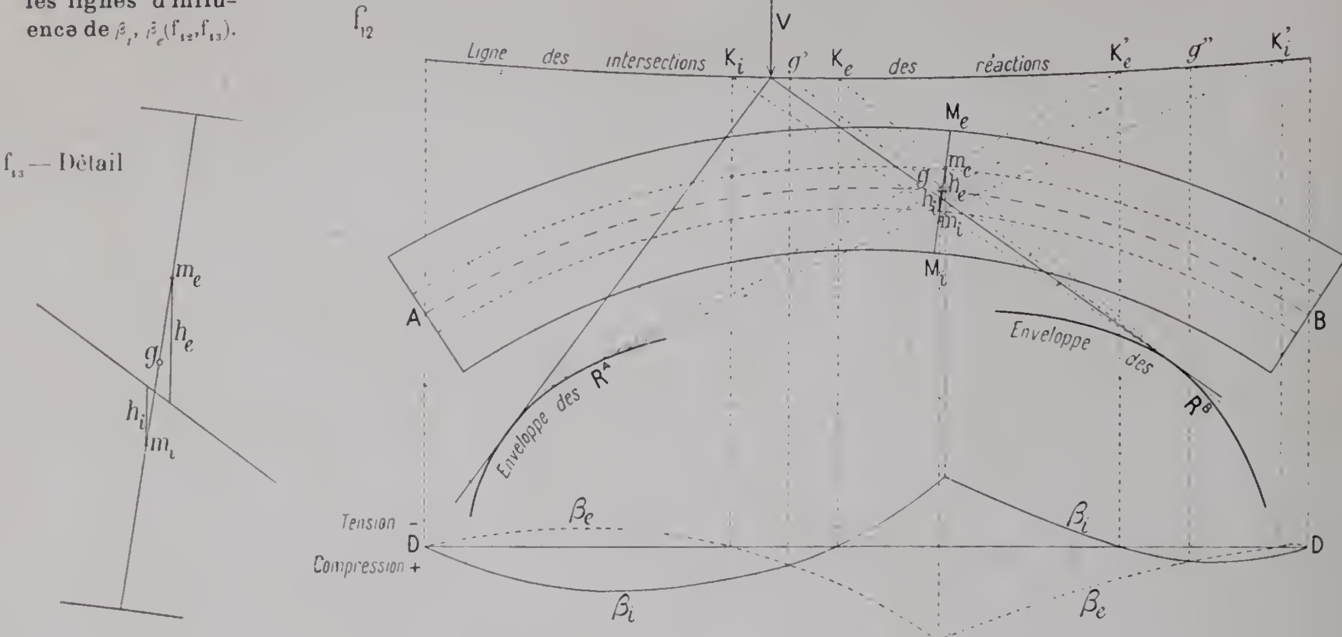
D'où $\beta_e = \dfrac{H\, h_i}{\frac{1}{6}e^2 l}$ $\qquad \beta_i = \dfrac{H\, h_e}{\frac{1}{6}e^2 l}$

H est la poussée horizontale due à une charge verticale 1 ; β_e, β_i sont les efforts pour une charge 1

Art. 2. — Comment, pour une section MM, on construit les lignes d'influence de β_i, β_e (f. 12, f. 13).

Comme pour une section donnée, $\frac{1}{6}e^2 l$ est constant, les lignes d'influence de β_i et β_e sont, à l'échelle près, celles des moments $\mathrm{H}\,h_e$, $\mathrm{H}\,h_i$.

f. 12



f. 13 — Détail

On a déjà construit la ligne d'influence de la poussée horizontale H ; c'est le funiculaire **5**. On mesure h_i, h_e sur l'épure.

On fait les produits $\mathrm{H}\,h_e$, $\mathrm{H}\,h_i$; on les divise par $\frac{1}{6}e^2 l$.

Le calcul détaillé est donné plus loin pour l'arc symétrique.

Art. 3. — Vérification des points des lignes d'influence sur leur horizontale de base (f. 12).

Par m_e, bord supérieur du noyau central de la section MM, menons une tangente à l'enveloppe des R^B et des R^A ; elle coupe en K_e, K'_e la courbe de leurs intersections. La force verticale suspendue à K_e, K'_e produira en M_i un effort $\beta_i = 0$ ($h_e = 0$).

Donc la ligne d'influence des β_i coupe son horizontale de base DD sur la verticale de K_e, de K'_e.

De même la ligne d'influence des β_e coupe DD sur la verticale de K_i, de K'_i.

Art. 4. — Zônes dans lesquelles les forces produisent des efforts > 0 ou < 0 (f. 12).

Une force entre K_e et K'_e a un $h_e < 0$; elle produira donc en M_i un effort β_i négatif : elle diminue le travail à l'intrados.

Une force à gauche de K_i, à droite de K'_i a aussi un $h_i < 0$; elle produira en M_e un effort $\beta_e < 0$: elle diminue le travail à l'extrados.

Une force entre $K_i\,K_e$, $K'_i\,K'_e$ produira en M_i et M_e un effort > 0 ; toute la section est comprimée[9].

Menons par le milieu g de M_eM_i des tangentes aux enveloppes. Elles coupent en g', g'' la ligne des intersections.

Les lignes d'influence de β_i, β_e se coupent sur les verticales de g', g''.

9. — Cette méthode de déterminer la charge la plus défavorable est due à Winkler « *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit* ». Prague 1867, p. 295 et 330.

CHAPITRE IV

CALCUL DES EFFORTS PAR $\overline{0^m01}^2$

DUS — NON PLUS A UNE FORCE 1 — MAIS AUX FORCES

(POIDS, SURCHARGES)

AGISSANT RÉELLEMENT SUR L'ARC.

§ 1. — *PAR LES LIGNES D'INFLUENCE DES* β_i, β_e (f_{12})

Chaque poids mort P, chaque surcharge V produit un effort réel β égal à l'ordonnée de la ligne d'influence, multipliée par P, par V.

Pour chaque section, on fera une fois pour toutes, la somme des efforts dus aux poids P; puis on calculera ceux dus aux surcharges pour différentes positions du train d'épreuve; on en déterminera par tâtonnements la somme maxima.

(Voir plus loin au titre IV le calcul pour un arc symétrique).

§ 2. — *PAR LES COURBES DE PRESSION*

Par un polygone des forces, on compose ensemble toutes les réactions R^A, toutes les réactions R^B. Soient $\mathcal{R}^A$, $\mathcal{R}^B$ les résultantes: on les met en place par un funiculaire.

Puis on construit un funiculaire des poids et surcharges dont le premier côté est $\mathcal{R}^A$ et dont le dernier sera $\mathcal{R}^B$. C'est la courbe des pressions.

On a les efforts β_i, β_e dans une section par les formules usuelles:

$$\beta_i = \frac{N}{el}\left(1 - \frac{6\,u}{e}\right) \qquad \beta_e = \frac{N}{el}\left(1 + \frac{6\,u}{e}\right) \qquad (f_{11})$$

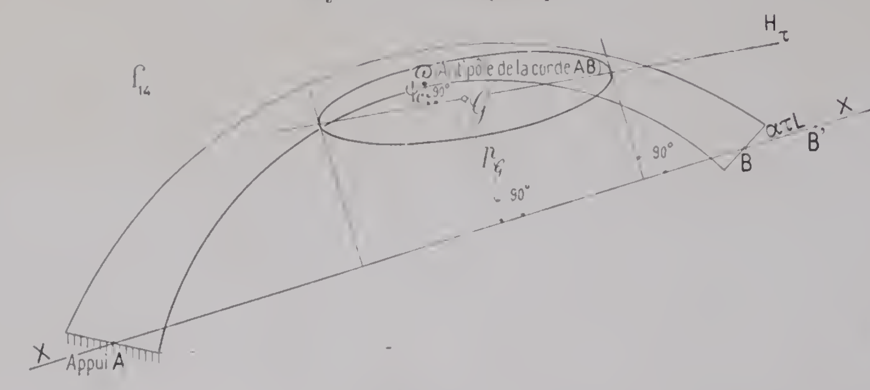
On a N par le polygone des forces agissant sur la voûte, u par la courbe des pressions.

En pratique, c'est par les lignes d'influence qu'on détermine les efforts: on ne construit guère de courbes de pression que pour les poids morts.

CHAPITRE V

RÉACTION H_τ DUE A UNE VARIATION DE TEMPÉRATURE τ

Supposons encore l'appui A fixe, l'appui B libre. Sous l'action d'une variation de température τ, une dimension l se dilate ou se contracte de $l\alpha\tau$. Les angles des joints avec la fibre moyenne ne changent pas.



B s'avance suivant la corde A B = L de B B' = $\alpha\tau$L : c'est une rotation autour d'un point π à l'infini sur une normale à la corde.

La réaction H_τ, pour ramener l'appui B à sa place, doit produire une translation égale et opposée. Ce sera l'antipolaire de π par rapport à l'ellipse totale ; elle passe par $\mathcal{G}$, puisque son antipôle est à l'infini et elle est conjuguée aux normales à la corde AB.

Déplacement = $\alpha\tau L = H_\tau \times$ moment centrifuge des φ par rapport à H_τ et à la corde AB.
$= H_\tau \times \sum_A^B \varphi \times p_{\mathcal{G}}$ (distance à la corde AB du centre élastique $\mathcal{G}$) $\times\ \psi_c$ (distance à la réaction H_τ de l'antipôle ϖ de la corde AB).

φ est $\dfrac{L}{EI}$ $\left(\text{et non } \dfrac{L}{I}\right)$.

$$H_\tau = \frac{E\alpha\tau L}{\sum_A^B \varphi\, p_{\mathcal{G}}\, \psi_c}$$

Si la température s'abaisse, H est négatif.

TITRE IV

ARC SYMÉTRIQUE

EFFORTS DANS LA VOÛTE DU PONT ANTOINETTE[1, 2]

CHAPITRE I

CARACTÉRISTIQUES ÉLASTIQUES DE L'ARC COURBE DES INTERSECTIONS ET COURBE ENVELOPPE DES RÉACTIONS

§ 1. — *DIMENSIONS DE LA VOÛTE*

Intrados arc de 31^m de rayon	Portée	47^{m}396	Épaisseur	à la clef	1^{m}50
	Montée	11^{m}015		aux retombées	2^{m}283
Fibre moyenne	Portée $2a' =$ 49^{m}142		Fruit des têtes		0.04
	Montée $b' =$ 11^{m}029		Largeur du pont au niveau des rails		4^{m}74

§ 2. — *CENTRE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Division de l'arc en 18 tranches.

On divise chaque demi-voûte en 9 tranches de 3^{m}08 de longueur comptée suivant la fibre moyenne.

Art. 2. — Axes des ellipses centrales des tranches. Leurs poids élastiques.

$a \left(\frac{1}{2} \text{ grand axe des ellipses centrales des tranches}\right) = 0.289 \times 3^m08 = 0^m890$ (p. 132).

Dans le calcul des moments d'inertie des sections transversales, on a admis comme largeur de la voûte, le rapport de la largeur réelle à 4^{m}74, largeur au niveau du rail.

Tableau I. — *Petit axe de l'ellipse centrale des tranches — Leurs poids élastiques.*

Nos des tranches à partir de la clef	Dimensions de la voûte au droit des centres de gravité g des tranches — Épaisseur e	Largeur l	Demi petit axe de l'ellipse centrale de la tranche $b = 0.289\ e$	Moment d'inertie de la section transversale $I = \frac{1}{12}\left(\frac{l}{4.74}\right)e^3$	Poids élastique de la tranche $\rho = \frac{L = 3^m08}{I}$
1	2	3	4	5	6
1 (clef)	1^{m}51	4^{m}88	0^{m}436	0.295386	10.4270
2	1.53	4.90	0.442	0.308540	9.9825
3	1.57	4.95	0.454	0.336779	9.1455
4	1.63	5.02	0.471	0.382215	8.0583
5	1.70	5.11	0.491	0.441376	6.9782
6	1.80	5.28	0.520	0.536240	5.7437
7	1.92	5.35	0.555	0.665729	4.6265
8	2.05	5.50	0.592	0.833038	3.6973
9 (retomb.)	2.20	5.68	0.635	1.063302	2.8967
					$\Sigma\rho$ (1/2 voûte) = 61.5557

1. — Tome II, p. 115.

2. — Je n'ai fait que résumer l'excellent mémoire de M. le Professeur Guidi : « *l'arco elastico senza cerniere* » Académie des Sciences de Turin, Novembre 1902.

Art. 3. — Centre élastique $\mathcal{G}$ de l'arc.

A. — Construction graphique. Funiculaires **1** *et* **2** *Pl. II.*

$\mathcal{G}$ est sur la verticale YY, axe de symétrie, axe de l'ellipse élastique.

Le funiculaire **1** des φ suspendus verticalement aux g (p. 133) est symétrique par rapport à YY ; ses côtés extrêmes se coupent sur YY ; il est horizontal à la clef.

Attachons les φ horizontalement aux g ; traçons un funiculaire **2** : $\mathcal{G}$ est sur l'horizontale XX passant par le point de rencontre sur YY de ses côtés extrêmes ; XX est l'autre axe de l'ellipse élastique.

Dans l'épure Pl. II, on a pris :

p' (distance polaire de **1**) $= 2a'$ (portée de la fibre moyenne) $= 49^{m}142$.

$$= \Sigma\varphi \left(\begin{array}{l} \text{voûte entière, 18 tranches, } 2 \times 61.5557 \text{ : c'est-à-dire que} \\ \varphi = 1 \text{ est représenté par } \dfrac{49^{m}142}{2 \times 61.5557} = 0^{m}3992. \end{array} \right)$$

Le pôle O' est en dehors de l'épure : pour tracer les rayons du polygone P', on a joint les divisions de l'échelle des φ à celles d'une échelle des $\frac{\varphi}{2}$ sur YY.

p'' (distance polaire de **2**) $= \dfrac{2a'}{6} = 8^{m}19$.

B. — Vérification par le calcul de la position de $\mathcal{G}$.

TABLEAU II. — *Position sur YY du centre élastique.*

Nos des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 6)	Par rapport à l'horizontale de g_9		Vérification : par rapport à $\mathcal{G}$X (horizontale de $\mathcal{G}$)	
		Ordonnées des g mesurées sur l'épure à 3^{cm} p. 1^{m}	Moments des φ	Ordonnées des g	Moments des φ
	φ	y	φy	$y' = y - 7^{m}376$	$\varphi y'$
1	2	3	4	5	6
1 (clef)	10.4270	$9^{m}89$	103.123	$2^{m}514$	26.21
2	9.9825	9.58	95.632	2.204	22.00
3	9.1455	9.00	82.310	1.624	14.85
4	8.0583	8.15	65.675	0.774	6.24
5	6.9782	7.01	48.916	— 0.366	— 2.55
6	5.7437	5.62	32.280	— 1.756	— 10.09
7	4.6265	3.97	18.365	— 3.406	— 15.76
8	3.6973	2.09	7.727	— 5.286	— 19.54
9 (ret.)	2.8967	0	0	— 7.376	— 21.36
$\Sigma\varphi$ ($\frac{1}{2}$ voûte)	61.5557		$\Sigma\varphi y =$ 454.028		$\Sigma\varphi y' =$ 0

$$\frac{\Sigma\varphi y}{\Sigma\varphi} = \frac{454.028}{61.5557} = 7^{m}376$$

$\mathcal{G}$ est à $7^{m}376$ au-dessus de g_9 :

La construction graphique est exacte.

A l'aide des axes a et b des ellipses centrales des tranches (art. 2 précédent), on marque les antipôles π^{Y} et π^{X} de $\mathcal{G}$Y et de $\mathcal{G}$X par rapport à ces ellipses.

§. 3. — *MOMENTS D'INERTIE DES φ PAR RAPPORT A $\mathcal{G}$Y, $\mathcal{G}$X AXES DE L'ELLIPSE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Moments d'inertie des φ par rapport à $\mathcal{G}$Y.

A. — Construction graphique. Funiculaire **3** *Pl. II.*

On suspend verticalement les moments des φ (φx, funiculaire **1**) aux antipôles de $\mathcal{G}$Y : on construit un polygone des forces, de pôle O''', pris sur le dernier côté de **1**, de distance polaire p''', puis le funiculaire **3**.

Avec $p''' = \dfrac{2a'}{4} = 12^{m}2855$ $\left(\text{soit } \dfrac{\Sigma\varphi}{4}\right.$, $\Sigma\varphi$ étant représenté par $2a'$, voir plus haut Art. 3 — A$\Big)$, on mesure sur l'épure :

Δ_{x}^{n} (distance verticale des côtés extrêmes de **3**) $= 12^{m}48$

B. — Vérification par le calcul

Tableau III. — *Calcul de* I_{Y^2} *et de* $\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$.

N^{os} des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 6)	Distance à YY mesurée sur l'épure à l'échelle de 3^{cm} pour 1^{m} — des centres de gravité g	des antipôles π^{Y}	Produits
	ρ	x	ξ_Y	$\rho x \xi_Y$
1	2	3	4	5
1 (clef)	10.4270	1^{m}54	2^{m}04	32.757
2	9.9825	4.61	4.78	219.972
3	9.1455	7.64	7.75	541.505
4	8.0583	10.62	10.68	913.985
5	6.9782	13.50	13.58	1279.313
6	5.7437	16.24	16.28	1518.561
7	4.6265	18.85	18.88	1646.516
8	3.6973	21.28	21.32	1677.427
9 (ret.)	2.8967	23.53	23.57	1606.516
		$\frac{1}{2} I_{Y^2} = \Sigma \rho x \xi_Y$ [3] $= 9436.552$		

$$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \frac{I_{Y^2}}{p'p'''}$$

$$= \frac{2 \times 9436{,}552 \text{ (Tableau III, col. 5)}}{49^{m}142 \times 12^{m}2855}$$

$\times\ 0^{m}3992$ ($\rho = 1$ p. 146 Art. 3—A) $= 12^{m}479$

La construction graphique est exacte.

Art. 2. — Moments d'inertie des ρ par rapport à $\mathcal{G}$X.

A. — Construction graphique. Funiculaire **4** *Pl. II.*

On attache horizontalement les moments des ρ (ρy, funiculaire **2**) aux antipôles de $\mathcal{G}$X. On construit un polygone des forces O^{IV} de distance polaire $p^{IV} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = 12^{m}48$, puis le funiculaire **4**.

On mesure sur l'épure :

$\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$ (distance horizontale des côtés extrêmes de **4** qui sont verticaux) $= 3^{m}86$

B. — Vérification par le calcul.

Tableau IV. — *Calcul de* I_{X^2} *et de* $\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$.

N^{os} des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 6)	Distance à XX mesurée sur l'épure à l'échelle de 3^{cm} pour 1^{m} — des centres de gravité g	des antipôles π^{X}	Produits
	ρ	y	η_X	$\rho y \eta_X$
1	2	3	4	5
1 (clef)	10.4270	2^{m}51	2^{m}57	67.261
2	9.9825	2.20	2.30	50.511
3	9.1455	1.62	1.77	26.224
4	8.0583	0.77	1.13	7.012
5	6.9782	0.37	1.23	3.176
6	5.7437	1.76	1.97	19.915
7	4.6265	3.41	3.52	55.532
8	3.6973	5.29	5.37	105.030
9 (ret.)	2.8967	7.38	7.46	159.477
		$\frac{1}{2} I_{X^2} = \Sigma \rho y \eta_X$ [3] $= 494.138$		

$$\overset{B}{\underset{A}{\Theta}} = \frac{I_{X^2}}{p''\,p^{IV}}$$

$$= \frac{2 \times 494.138 \text{ (Tableau IV, col. 5)}}{8^{m}19 \times 12^{m}48}$$

$\times\ 0^{m}3992$ ($\rho = 1$ p. 146 Art. 3-A) $= 3^{m}860$

La construction graphique est exacte.

Art. 3. — Demi-axes a'', b'' de l'ellipse élastique de l'arc.

$I_{Y^2} = a''^2\ \Sigma\rho \qquad a'' = 12^{m}38.$

$I_{X^2} = b''^2\ \Sigma\rho \qquad b'' = 2^{m}83.$

Sur l'épure Pl. II, on a tracé l'ellipse en traits discontinus.

3. — Théorème de Culmann p. 122.

§ 4. — *MOMENTS CENTRIFUGES DES φ PAR RAPPORT : D'UNE PART A UNE FORCE VERTICALE, D'AUTRE PART A XX (FUNICULAIRE* **5**, Pl. II)

On suspend verticalement aux antipôles de XX les moments des φ (φ*y*, funiculaire **2**).

On trace un polygone des forces de pôle O^V placé sur le premier côté de **3** et de distance polaire $p^V = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} = 3^m86$.

5 est en chapeau de gendarme : ses côtés extrêmes se confondent ; suivant des parallèles à ces côtés, il est symétrique par rapport à YY.

§ 5. — *RÉACTIONS DUES A UNE CHARGE VERTICALE* (Pl. II)

Art. 1. — Réactions de $V_5 = 1^T$, appliquée au milieu du joint séparant les tranches 4, 5.

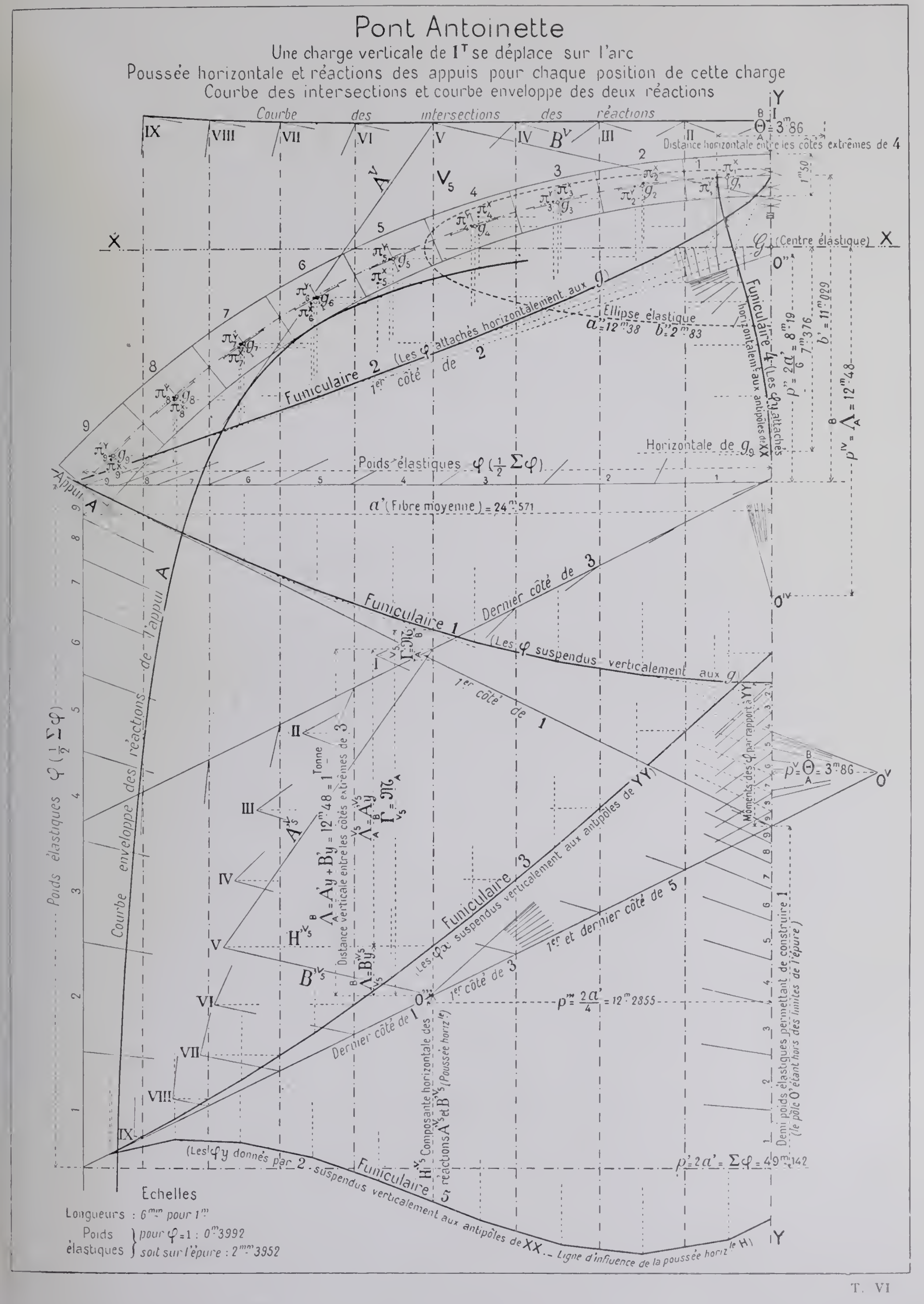
On a de suite, sur la verticale de V_5, par le funiculaire **3** : $A'^{V_5}_y$ et $B'^{V_5}_y$ composantes verticales des 2 réactions ; par le **5**, H'^{V_5} composante horizontale des 2 réactions, puis les réactions A^{V_5} et B^{V_5} (intensité et direction), puis, par les moments $\mathfrak{M}$ mesurés sur **1**, leurs lignes de force, vérifiées par leurs coordonnées à l'origine.

Pour $V = 1^T$, on divisera les forces par $\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = 12^m48$.

Art. 2. — Réactions dues à une charge de 1^T appliquée au milieu de toutes les sections qui séparent les tranches.

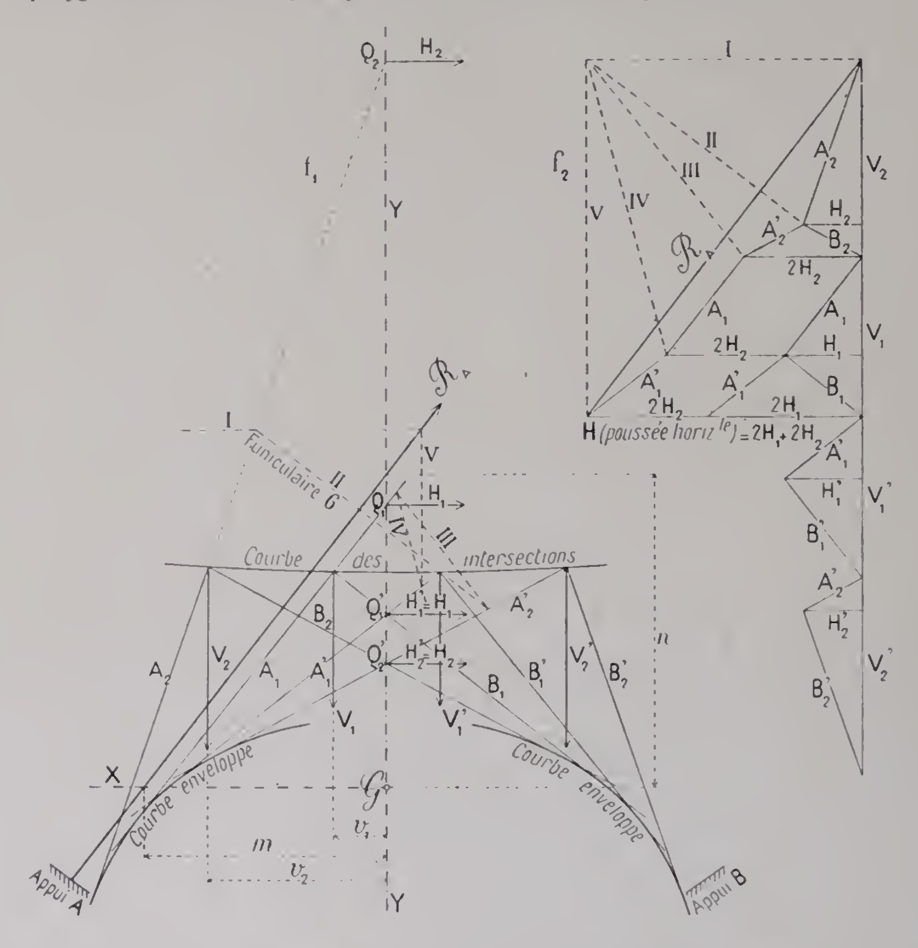
TABLEAU V.

Emplacement de la charge				Unités	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Longueurs d'après l'épure à l'échelle de 3cm p. 1m			$\overset{B}{\underset{V}{\Gamma}} = \mathfrak{M}_A$	m	5.190	6.850	8.757	10.860	13.100	15.467	17.833	20.213	22.483
			$\overset{V}{\underset{A}{\Gamma}} = \mathfrak{M}_B$	m	5.190	3.783	2.633	1.733	1.067	0.600	0.287	0.117	0.027
	Réactions des appuis	composantes	H'	m	14.133	13.617	12.150	10.000	7.517	5.000	2.867	1.267	0.310
			A'_y	m	6.240	7.523	8.730	9.803	10.710	11.410	11.903	12.260	12.427
			B'_y	m	6.240	4.957	3.750	2.677	1.770	1.070	0.577	0.220	0.053
			A'	m	15.450	15.533	14.950	13.983	13.067	12.450	12.200	12.267	12.383
			B'	m	15.450	14.467	12.700	10.333	7.700	5.100	2.917	1.267	0.320
H (composante horizle des réactions)			$\frac{H'}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}$	T	1.132	1.091	0.974	0.801	0.602	0.401	0.230	0.102	0.025
Réactions de l'appui	de gauche A	**A** (intensité)	$\frac{A'}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}$	T	1.238	1.245	1.198	1.120	1.047	0.998	0.978	0.983	0.992
		r (distance à $\mathcal{G}$)	$\frac{\mathfrak{M}_A}{A}$	m	4.192	5.502	7.310	9.696	12.512	15.498	18.234	20.562	22.664
		coordonnées à l'origine — abscisse	$\frac{\mathfrak{M}_A \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}{A'_y}$	m	10.380	11.364	12.519	13.826	15.265	16.917	18.697	20.576	22.579
		coordonnées à l'origine — ordonnée	$\frac{\mathfrak{M}_A \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}{H'}$	m	4.583	6.278	8.995	13.553	21.749	38.605	77.627	199.100	937.380
	de droite B	**B** (intensité)	$\frac{B'}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}$	T	1.238	1.159	1.018	0.828	0.617	0.409	0.234	0.101	0.026
		r (distance à $\mathcal{G}$)	$\frac{\mathfrak{M}_B}{B}$	m	4.192	3.264	2.586	2.092	1.729	1.467	1.227	1.158	1.038
		coordonnées à l'origine — abscisse	$\frac{\mathfrak{M}_B \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}{B'_y}$	m	10.380	9.524	8.763	8.079	7.523	6.998	6.208	6.637	6.358
		coordonnées à l'origine — ordonnée	$\frac{\mathfrak{M}_B \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}{H'}$	m	4.583	3.467	2.705	2.162	1.771	1.498	1.249	1.152	1.087



Pont Antoinette
Une charge verticale de 1T se déplace sur l'arc
Poussée horizontale et réactions des appuis pour chaque position de cette charge
Courbe des intersections et courbe enveloppe des deux réactions
Courbe des intersections des réactions
Distance horizontale entre les côtes extrêmes de 4
(Centre élastique)
Ellipse élastique
Funiculaire 2 (Les φ attachés horizontalement aux g)
1er côté de 2
Funiculaire 4 (Les φ attachés horizontalement aux antipôles de XX)
Horizontale de g9
Poids élastiques φ (½ Σφ)
Appui A
a' (Fibre moyenne) = 24m571
Funiculaire 1 (Les φ suspendus verticalement aux g)
Dernier côté de 3
1er côté de 1
Courbe enveloppe des réactions de l'appui A
Poids élastiques φ (½ Σφ)
Distance verticale entre les côtes extrêmes de 3
Funiculaire 3 (Les φx suspendus verticalement aux antipôles de YY)
1er et dernier côté de 5
1er côté de 3
Dernier côté de 1
Moments des φ par rapport à YY
Demi poids élastiques permettant de construire 1 (le pôle O' étant hors des limites de l'épure)
Composante horizontale des réactions A et B (Poussée horiz.le)
(Les φy donnés par 2 suspendus verticalement aux antipôles de XX) Funiculaire 5 Ligne d'influence de la poussée horiz.le H
Echelles
Longueurs : 6mm pour 1m
Poids élastiques pour φ = 1 : 0m3992 soit sur l'épure : 2mm3952

Au polygone des forces (f_2), A'_2 est le symétrique de B_2, A'_1 celui de B_1.



La réaction résultante $\mathcal{R}_A$ de l'appui A ferme le polygone $A_2 A'_2 A_1 A'_1$; on la met en place à l'aide d'un funiculaire **6** (f_1).

En raison de la symétrie, on ne fait la construction que pour la demi-arche.

Art 2. — Vérification. — Calcul des ordonnées à l'origine de $\mathcal{R}_A$[6].

Prenons les moments autour du centre élastique $\mathcal{G}$ de la résultante $\mathcal{R}_A$ et de ses composantes A_1, A_2, A'_1, A'_2.

$$\mathfrak{M}^t \text{ (de } \mathcal{R}_A) = \mathfrak{M}^t \text{ de } A_2 + \mathfrak{M}^t \text{ de } A_1 + \mathfrak{M}^t \text{ de } A'_1 + \mathfrak{M}^t \text{ de } A'_2$$

$$\mathfrak{M}^t \text{ de } A_2 = \mathcal{G}Q_2 \times H_2 = (\mathcal{G}Q'_2 + Q'_2Q_2)\, H_2 = \mathcal{G}Q_2 \times H_2 + Q'_2Q_2 \times H_2$$

$$= \mathcal{G}Q'_2 \times H'_2 \text{ (puisque } H'_2 = H_2) + v_2 V_2 \begin{pmatrix} \text{Moment de } A_2 \text{ autour de } Q'_2 \\ = Q'_2Q_2 \times H_2 \end{pmatrix}$$

de même :

$$\mathfrak{M}^t \text{ de } A_1 = \mathcal{G}Q'_1 \times H'_1 + v_1 V_1 \qquad \mathfrak{M}^t \text{ de } A'_1 = \mathcal{G}Q'_1 \times H'_1 \qquad \mathfrak{M}^t \text{ de } A'_2 = \mathcal{G}Q'_2 \times H'_2$$

$$\mathfrak{M}^t \text{ de } \mathcal{R}_A = 2\mathcal{G}Q'_1 \times H'_1 + 2\mathcal{G}Q'_2 \times H'_2 + v_2V_2 + v_1V_1$$

$$= 2\Sigma H h \left(\substack{\text{moments des H} \\ \text{1/2 arche de droite}}\right) + \Sigma V v \left(\substack{\text{moment des V} \\ \text{sur une 1/2 arche}}\right).$$

6. — M. Guidi — *L'arco elastico senza cerniere.*

Soient m et n les coordonnées à l'origine de $\mathcal{R}_A$:

$$\mathfrak{M}^t \text{ (de } \mathcal{R}_A) = m\Sigma V \text{ (poids mort)} = n 2 \Sigma H \text{ (poussée)}.$$

Voici les calculs pour le pont Antoinette.

TABLEAU VII.

Nos des tranches	Ordonnées de la ligne d'influence de H (funiculaire 5) de la Pl. II	Poussées horizontales (col. 2) × (col. 6 du Tableau VI) $\mathcal{H}$	Réactions de l'appui de gauche produites par les charges sur la demi-voûte de droite: Distances verticales de ces réactions au centre élastique $\mathcal{G}$ h (à prendre sur la Pl. II).	Réactions de l'appui de gauche produites par les charges sur la demi-voûte de droite: Moments des réactions autour de $\mathcal{G}$ $\mathcal{H}h$
1	2	3	4	5
		T		mT
1 (clef)	1m132	20.29	3m950	80.15
2	1.030	19.94	3.050	60.82
3	0.880	20.95	2.390	50.07
4	0.680	19.98	1.910	38.16
5	0.520	12.65	1.640	20.75
6	0.306	4.67	1.350	6.30
6bis	0.244	6.45	1.280	8.25
7	0.155	2.59	1.190	3.08
8	0.052	0.95	1.120	1.06
8bis	0.029	1.09	1.100	1.20
9 (retombée)	0.003	0.06	1.025	0.06

$\frac{\mathcal{H}}{2}$ (demi-poussée) $= \Sigma H = 109^{T}.62$ $\qquad \Sigma H h = 269^{mT}.90$

$\mathcal{H}$ (poussée) $= 219^{T}.24$

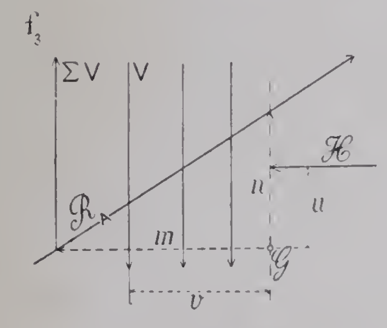
$\mathfrak{M}^t$ de $\mathcal{R}_A = 2 \times 269.90$ ($\Sigma H h$, Tableau VII col. 5) + 3664.59 ($\Sigma V v$) $= 4204^{mT}.39$

$$m = \frac{4204^{mT}.39}{249^{T}51 \text{ (poids mort) Tableau VI}} = 16^{m}851$$

$$n = \frac{4204^{mT}.39}{2 \times 109^{T}62 \text{ (poussée) Tableau VII}} = 19^{m}177$$

§ 3. — *TRACÉ DU FUNICULAIRE DES PRESSIONS,*

EN SE SERVANT DE LA RÉACTION RÉSULTANTE $\mathcal{R}_A$ DE L'APPUI



On trace le funiculaire des charges ayant comme premier côté $\mathcal{R}_A$ mise en place : c'est le polygone des pressions.

Il est bon de vérifier par le calcul son point de passage à la clef :

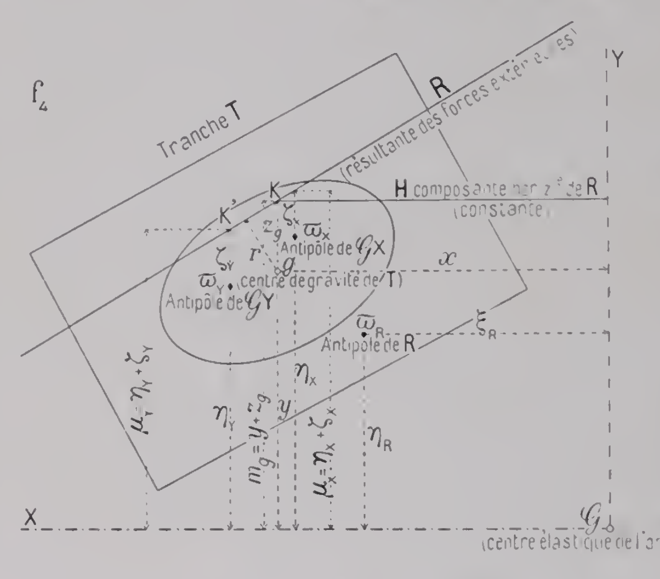
$$u\mathcal{H} = m\Sigma V - \Sigma V v = 2\Sigma H h = 539^{mT}.80$$

$$u = 2^{m}.462$$

La courbe des pressions du poids mort est tout entière dans le 1/3 central : elle s'écarte peu de la fibre moyenne.

§ 4. — *COMMENT, DANS UN ARC SYMÉTRIQUE ET SYMÉTRIQUEMENT CHARGÉ DE POIDS VERTICAUX, ON TRACE LE FUNICULAIRE DES PRESSIONS, SANS AVOIR AU PRÉALABLE CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS. MÉTHODE DE M. GUIDI* [7]

Art. 1. — Si, par des verticales on transporte sur la courbe des pressions les centres de gravité des tranches et les antipôles de l'axe $\mathcal{G}$Y par rapport aux ellipses centrales des tranches, et qu'on construise une ellipse des poids élastiques ainsi déplacés, elle a même centre $\mathcal{G}$, mêmes axes de symétrie $\mathcal{G}$Y, $\mathcal{G}$X que l'ellipse élastique de l'arc.



La résultante R des efforts sur une tranche T (f_4) fait tourner sa section extrême de droite par rapport à sa section extrême de gauche de : $\Delta\theta = Rr\left(\frac{L}{EI}\right) = Rr\varphi$ autour de l'antipôle ϖ_R de R. [8]

Les déplacements du centre élastique $\mathcal{G}$, origine des coordonnées, considéré comme invariablement lié à l'appui de droite supposé libre, sont :

$$\Delta\theta = Rr\varphi \qquad \Delta Y = Rr\varphi\xi_R \qquad \Delta X = Rr\varphi\eta_R \quad [9]$$

Pour l'arc entier, ensemble des tranches, la somme des déplacements élastiques entre deux appuis invariables est nulle.

$$\Sigma\Delta\theta = 0 \qquad \Sigma\Delta Y = 0 \qquad \Sigma\Delta X = 0$$

ou $$\sum_A^B Rr\varphi = 0 \qquad \sum_A^B Rr\varphi\xi_R = 0 \qquad \sum_A^B Rr\varphi\eta_R = 0$$

Soit H la composante horizontale de R, laquelle est la même pour toutes les tranches, uisque l'arc n'est soumis qu'à des forces verticales :

$$Rr = Hz_g$$

$$\sum_A^B Hz_g\varphi = 0 \qquad \sum_A^B Hz_g\xi_R\varphi = 0 \qquad \sum_A^B Hz_g\eta_R\varphi = 0$$

Divisons par la constante H :

$$\sum_A^B z_g\varphi = 0 \qquad \sum_A^B z_g\xi_R\varphi = 0 \qquad \sum_A^B z_g\eta_R\varphi = 0$$

Soient ϖ_X, ϖ_Y les antipôles des deux axes $\mathcal{G}$X, $\mathcal{G}$Y.

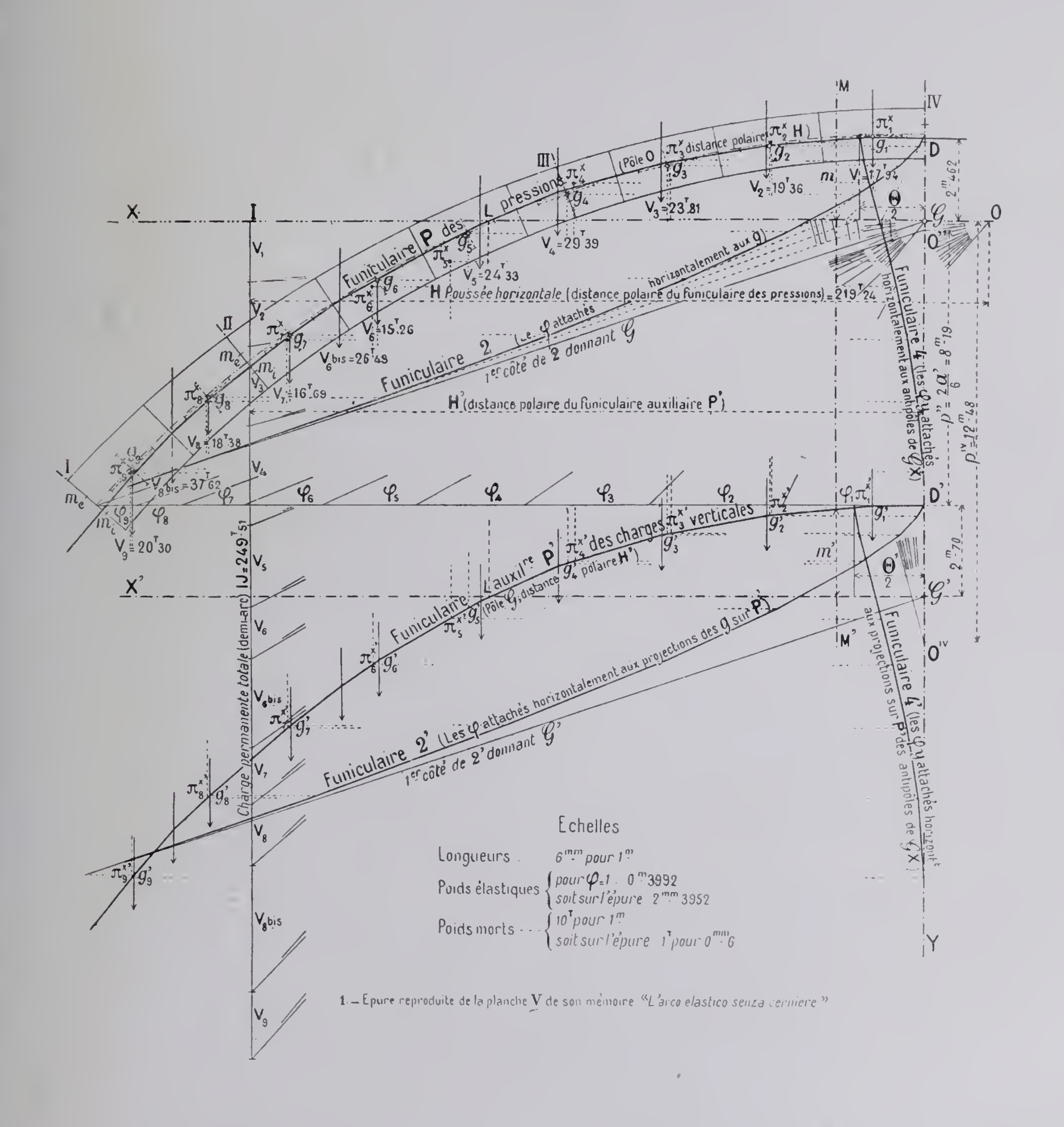
Le moment centrifuge de la masse φ par rapport aux deux axes R et $\mathcal{G}$Y peut s'écrire indifféremment [10] $\varphi z_g\xi_R$ ou $\varphi\zeta_Y x$. Donc $z_g\xi_R = \zeta_Y x$.

7. — *L'arco elastico senza cerniere* — Académie des sciences de Turin — Novembre 1902. *Contributo alla teoria degli archi elastici.* Mai 1908.

8. — VI, p. 125. 9. — VI, p. 130. 10. — Théorème de Culmann, VI, p. 122.

Pont Antoinette

Courbe de pression sous les poids morts
tracée à l'aide d'un funiculaire auxiliaire P'
sans avoir construit la courbe des intersections ni la courbe enveloppe des réactions
(Méthode de M. Guidi)[1]



1. — Épure reproduite de la planche V de son mémoire "L'arco elastico senza cerniere"

De même le moment centrifuge de φ par rapport à R et $\mathcal{G}$X s'écrira :

$$\varphi z_g \eta_R \quad \text{ou} \quad \varphi \zeta_X y \ . \qquad \text{Donc} \quad z_g \eta_R = \zeta_X y$$

Les trois équations précédentes deviennent :

$$\sum_A^B z_g \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \zeta_Y x \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \zeta_X y \varphi = 0$$

soit, en posant $z_g = m_g - y \qquad \zeta_Y = \mu_Y - \eta_Y \qquad \zeta_X = \mu_X - \eta_X$

$$\sum_A^B m_g \varphi - \sum_A^B y \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \mu_Y x \varphi - \sum_A^B \eta_Y x \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \mu_X y \varphi - \sum_A^B \eta_X y \varphi = 0$$

$\mathcal{G}$X est un axe de l'ellipse élastique de l'arc : donc $\sum_A^B y \varphi = 0$

$\mathcal{G}$X, $\mathcal{G}$Y sont les 2 axes : donc $\sum_A^B \eta_Y x \varphi \begin{pmatrix}\text{moment centrifuge des } \varphi \\ \text{par rapport à } \mathcal{G}\text{X et } \mathcal{G}\text{Y}\end{pmatrix} = 0$

Les trois équations se réduisent à

$$\sum_A^B m_g \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \mu_Y x \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \mu_X y \varphi - \sum_A^B \eta_X y \varphi = 0$$

Attachons en K le poids élastique φ.

Si $\sum_A^B m_g \varphi = 0$, c'est que $\mathcal{G}$X passe par le centre de gravité des φ attachés en K ; $\mathcal{G}$Y, axe de symétrie, y passe évidemment.

$\sum_A^B \varphi \mu_Y x$ est le moment centrifuge des φ dont K serait le centre de gravité, K' l'antipôle.

S'il est nul, c'est que $\mathcal{G}$X, $\mathcal{G}$Y, axes de l'ellipse centrale des masses φ attachées aux centres de gravité g des tranches, sont encore les axes de l'ellipse des φ attachées à l'intersection des verticales des g et de la courbe des pressions à construire.

Art. 2. — Construction du funiculaire des pressions à l'aide d'un funiculaire auxiliaire (Pl. III).

Soient : V_1, V_2, ... les poids agissant sur l'arc.

Sur une horizontale D', plaçons les poids élastiques φ ; traçons un polygone des φ avec le pôle O'', la distance polaire O'' D' = p'' $\left(= \dfrac{2a'}{6} = 8^m19\right)$, puis le funiculaire **2** (le même que Pl. II), qui place le centre élastique $\mathcal{G}$ des φ attachées aux g des tranches.

A un point I de $\mathcal{G}$X à une distance arbitraire H' de $\mathcal{G}$ (ici H' = 20^m), suspendons verticalement les poids morts $V_1 V_2$ . . . . . et traçons un polygone des forces V avec le pôle $\mathcal{G}$, la distance polaire H', puis le funiculaire auxiliaire **P'**.

Aux points d'intersection g'_1, g'_2, ... des côtés de **P'** avec les verticales de g_1, g_2, ... appliquons horizontalement les poids élastiques $\varphi_1 \varphi_2$, ... ; à l'aide du polygone O'' de distance polaire p'', traçons le funiculaire **2'** ; son premier côté coupe $\mathcal{G}$Y au centre de gravité $\mathcal{G}'$.

Supposons pour un instant tracé le funiculaire **P** des pressions à construire ; soient O le pôle, O I = H la distance polaire (poussée horizontale), O I J son polygone des forces.

Les 2 funiculaires **P, P'** sont relatifs aux mêmes forces verticales V_1, V_2... ; soient m, m' les segments interceptés sur une verticale M M' par des droites homologues.

$$Hm = H'm' \quad {}^{11}$$

Les axes $\mathcal{G}X$, $\mathcal{G}'X'$ sont « homologues ». Leurs intersections L et L' avec **P** et **P'** sont sur une même verticale.

On a ainsi un premier point L de **P**.

Reprenons la troisième équation (p. 153), $\sum_A^B \mu_{iX}\, y\varphi_i = \sum_A^B \nu_X\, y\varphi_i$.

Multiplions ses 2 termes par la constante H.

$$\sum_A^B H\mu_{iX}\, y\varphi_i = H \sum_A^B \nu_X\, y\varphi_i \,.$$

Comme on vient de le voir, $H\mu_{iX} = H'\mu'_{iX}$

$$\sum_A^B H'\mu'_{iX}\, y\varphi_i = H' \sum_A^B \mu'_{iX}\, y\varphi_i = H \sum_A^B \nu_X\, y\varphi_i$$

$$H = H' \frac{\sum_A^B \mu'_{iX}\, y\varphi_i}{\sum_A^B \nu_X\, y\varphi_i}$$

$\sum_A^B \nu_X\, y\varphi_i$ est le moment d'inertie de l'arc par rapport à $\mathcal{G}X$ (f_4).

Soit $\Theta_A^B = 3^{m}86$ la distance horizontale des côtés extrêmes du funiculaire **4** (Pl. II)

$$\sum_A^B \nu_X\, y\varphi_i = I_{A\,X^2}^{B} = p'' p^{IV} \Theta_A^B$$

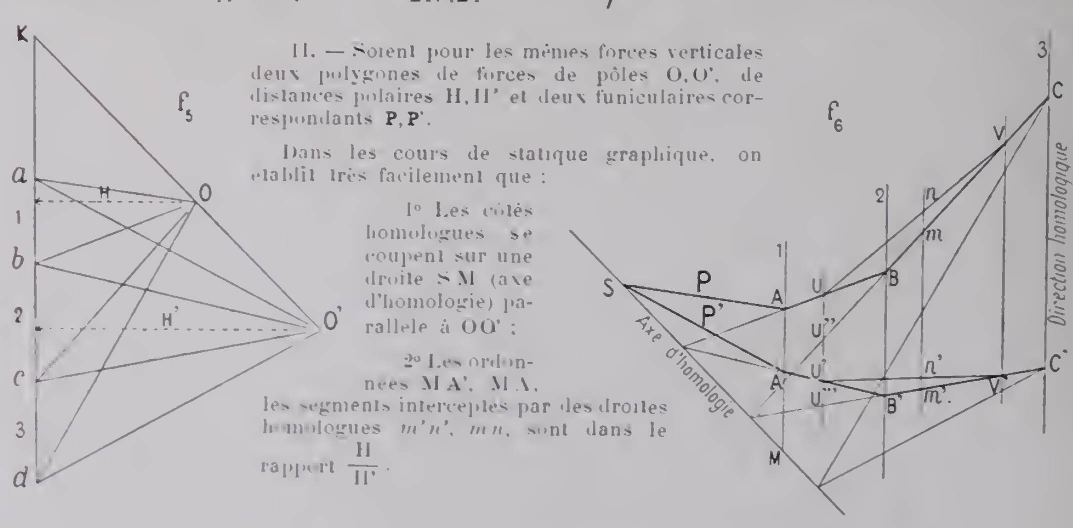
Pour avoir $\sum_A^B \mu'_{iX}\, y\varphi_i$, projetons verticalement sur **P'** les antipôles de $\mathcal{G}X$; à ces projections, attachons horizontalement les moments statiques $\frac{\varphi y}{p''}$ (ils sont donnés par le funiculaire **2** sur $\mathcal{G}X$). Traçons avec le pôle O^{IV} et la distance polaire p^{IV} un funiculaire **4'** : ses côtés sont parallèles à ceux de 4.

Soit $\Theta' = 4^{m}23$ la distance horizontale de ses côtés extrêmes :

$$\sum_A^B \mu'_{iX}\, y\varphi_i = p'' p^{IV} \Theta'$$

$$H = H' \frac{\Theta'}{\Theta} \left(\text{soit, sur l'épure : } 200 \times \frac{4.23}{3.86} = 219^{T},24\right)$$ Valeur trouvée autrement p. 151, tableau VII

$$\mathcal{G}D = \mathcal{G}'D' \times \frac{H'}{H} = \left(2^{m}70 \times \frac{200}{219.24} = 2^{m}462\right)$$ Valeur trouvée autrement p. 151, § 3.



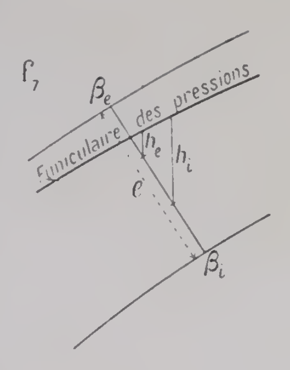
II. — Soient pour les mêmes forces verticales deux polygones de forces de pôles O, O', de distances polaires H, H' et deux funiculaires correspondants **P**, **P'**.

Dans les cours de statique graphique, on établit très facilement que :

1° Les côtés homologues se coupent sur une droite SM (axe d'homologie) parallèle à OO' ;

2° Les ordonnées MA', MA, les segments interceptés par des droites homologues $m'n'$, mn, sont dans le rapport $\frac{H}{H'}$.

§ 5. — *TRAVAIL PAR $\overline{0^m01}^2$, AU POIDS MORT, A LA CLEF, SUR L'APPUI, ET DANS 2 SECTIONS INTERMÉDIAIRES*



Section (Pl. III)	I (appui)	II	III	IV (clef)
Épaisseur de la voûte e	2m283	1m99	1m63	1m50
Largeur de l'ouvrage l	5m76	5m42	5m02	4m88
$\frac{1}{6}\,\frac{l}{4{,}74}\,e^2 = J$ (voir plus bas)	1.056	0.755	0.469	0.386
Bras de levier à mesurer sur l'épure. Distance verticale des bords du noyau central au funiculaire des pressions. h_i	0m28	0m27	0m38	0m15
h_e	0m85	0m58	0m18	0m35
$\mathfrak{M}_i = H\ (219^T24)\ h_i$	61mT39	59mT19	83mT31	32mT89
$\mathfrak{M}_e = H h_e$	186mT35	127mT16	39mT46	76mT73
Efforts par $\overline{0^m{,}01}^2$ à l'intrados $\beta_i = \frac{\mathfrak{M}_e}{10J}$ (voir plus bas).	17k7	16k8	8k4	19k9
à l'extrados $\beta_e = \frac{\mathfrak{M}_i}{10J}$ (voir plus bas).	5k8	7k8	17k8	8k5

CHAPITRE III

EFFORTS PAR $\overline{0{,}01}^2$ DUS AUX SURCHARGES ROULANTES

§ 1. — *SURCHARGE ROULANTE ISOLÉE DE 1T*

Art. 1. — Moment de l'effort sur une section S par rapport aux bords du noyau central.

Soit V une surcharge isolée de 1^T ; à l'aide de la courbe des intersections des réactions et de leur enveloppe, on construit ses deux réactions A et B de composante horizontale H.

Soient S une section, h_i, h_e les distances verticales à A des bords m_i, m_e du noyau central de S

$$\left(\begin{array}{ll} h_i > 0 \text{ au-dessus de } m_i, & < 0 \text{ au-dessous} \\ h_e < 0 \text{ au-dessus de } m_e, & > 0 \text{ au-dessous} \end{array}\right)$$

La poussée H est mesurée sur la verticale de V par l'ordonnée du funiculaire **5** (Pl. II) divisée par $\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$, funiculaire **3**.

Soit $J = \frac{1}{6}\,e^2 \left(\begin{array}{c}\text{épaisseur de} \\ \text{la voûte en S}\end{array}\right) \times l \left(\frac{\text{largeur de la voûte}}{4^m{,}74}\right)$

Le travail par $0^m{,}01^2$ dans la section S dû à la surcharge de 1^T placée en V, est (p. 141) :

$$\text{à l'intrados} \quad \beta_i = \frac{Hh_e}{10J} \qquad\qquad \text{à l'extrados} \quad \beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$$

(H en tonnes, h_e, h_i, e en mètres)

Art. 2. — Lignes d'influence de β_i et β_e pour 4 sections : la retombée (section I), 2 autres sections (II, III), et la clef (IV).

On a fait les calculs de l'art. 1 pour ces 4 sections et pour 11 positions de la surcharge V : ils sont résumés au tableau VIII. On a tracé ensuite les lignes d'influence de β_i et β_e (Pl. IV).

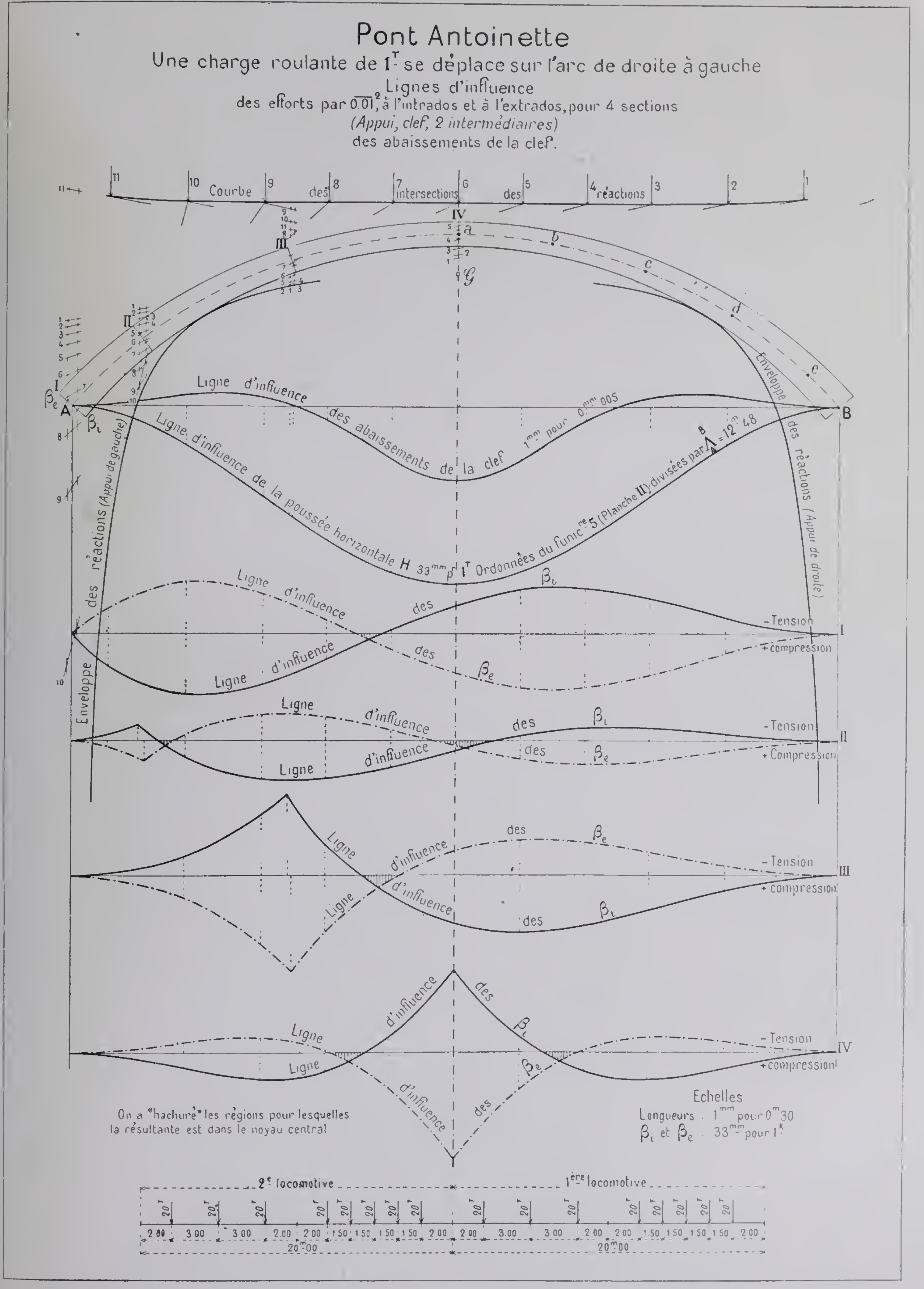
Tableau VIII. — *Une surcharge roulante isolée de* 1 T. *se déplaçant de droite à gauche, occupe successivement 11 positions (1 à 11. col. 1)*

Calcul pour 4 sections (appui, clef et 2 intermédiaires), des efforts par 0.01² *à l'intrados et à l'extrados.*

Positions de la surcharge		Poussées horizontales	Section I. — Appui de gauche. J = 1.056						Section II. — J = 0.755						Section III. — J = 0.469						Section IV — clef. — J = 0.386					
Nos	Distances à la Clef	H	h_e	h_i	Hh_e	Hh_i	$\beta_i = \frac{Hh_e}{10J}$	$\beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$	h_e	h_i	Hh_e	Hh_i	$\beta_i = \frac{Hh_e}{10J}$	$\beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$	h_e	h_i	Hh_e	Hh_i	$\beta_i = \frac{Hh_e}{10J}$	$\beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$	h_e	h_i	Hh_e	Hh_i	$\beta_i = \frac{Hh_e}{10J}$	$\beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$
	m	T	m	m			k	k	m	m			k	k	m	m			k	k	m	m			k	k
1	22.24	0.030	−5.10	−5.67	−0.153	+0.170	−0.0145	+0.0161	−1.65	+2.25	−0.049	+0.067	−0.0065	−0.0089	+1.81	−1.27	+0.054	0.038	+0.0115	0.0081	+1.77	−1.27	0.053	0.038	0.0137	0.0098
2	17.28	0.245	−4.78	+5.35	1.171	1.311	−0.1109	+0.1243	−1.44	+2.05	−0.353	+0.502	−0.0467	+0.0665	−1.80	−1.26	+0.441	0.309	+0.0940	−0.0659	+1.55	−1.05	+0.380	−0.257	+0.0984	−0.0666
3	12.40	0.580	−4.20	+4.81	−2.436	2.790	−0.2307	+0.2642	−1.07	1.69	−0.621	0.980	−0.0822	+0.1298	−1.79	−1.23	+1.038	0.713	+0.2213	0.1520	+1.12	−0.62	+0.649	−0.360	0.1681	−0.0933
4	8.25	0.860	−3.58	+4.22	−3.079	+3.629	−0.2916	+0.3437	−0.65	+1.30	−0.559	+1.118	−0.0740	+0.1481	+1.74	1.18	+1.496	−1.015	+0.3190	−0.2164	+0.54	−0.04	+0.464	−0.034	0.1202	−0.0088
5	4.13	1.060	−2.78	+3.45	−2.947	+3.657	−0.2791	+0.3463	−0.17	0.85	−0.180	+0.901	−0.0238	+0.1193	+1.59	1.00	+1.685	−1.060	0.3593	−0.2260	−0.36	+0.86	−0.382	+0.912	0.0990	+0.2363
6 Clef		1.132	−1.62	+2.40	−1.831	2.717	−0.1734	+0.2572	+0.47	+0.23	+0.532	+0.260	+0.0703	+0.0344	+1.24	0.65	+1.403	−0.735	+0.2989	−0.1567	−1.81	+2.31	−2.049	+2.615	−0.5308	+0.6775
7	4.13	1.060	−0.17	+1.00	−0.180	1.060	−0.0170	+0.1004	+1.25	−0.49	+1.325	−0.519	+0.1755	−0.0687	+0.46	+0.17	+0.488	0.180	+0.1041	+0.0384						
8	8.25	0.860	2.05	−1.05	1.763	−0.903	+0.1670	−0.0855	+2.17	−1.28	+1.866	−1.101	+0.2471	−0.1458	−1.07	1.99	0.920	+1.711	0.1962	+0.3648						
		0.710														+4.04		+2.868		+0.6115						
		0.695													3.52		−2.446		−0.5215							
9	12.40	0.580	+5.90	−4.58	+3.422	−2.656	+0.3241	−0.2515	+3.29	−2.15	+1.908	−1.247	+0.2527	0.1652	3.14	+3.60	1.821	+2.088	−0.3882	+0.4452						
10	17.28	0.245	+16.87	−14.18	+4.133	−3.474	+0.3914	−0.3290	+3.19	−1.00	+0.781	0.245	+0.1034	0.0324	−2.28	+2.75	0.559	+0.674	0.1192	+0.1437						
		0.110								+9.20		+1.012		+0.1340												
		0.095							−8.70		−0.826		0.1094													
11	22.24	0.030	−13.48[12]	+13.87[12]	2.196	1.604	+0.2079	0.1519	−8.50	+8.95	−0.255	+0.268	−0.0338	+0.0355	−1.83	+2.31	−0.055	0.069	−0.0117	+0.0147						

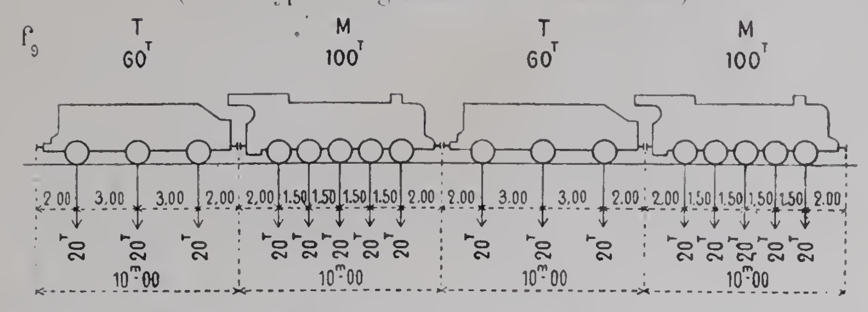
12. — On ne peut pas tracer A_{11}. On considère l'autre composante B_{11} dont le moment est diminué de celui de la résultante $V_{11} = 1^T$.

$$Hh_i = +0.03 \times 13.87 - 1 \times 2.02 = -1.604.$$
$$Hh_e = -0.03 \times 13.48 + 1 \times 2.60 = +2.196.$$


Pont Antoinette
Une charge roulante de 1T se déplace sur l'arc de droite à gauche
Lignes d'influence
des efforts par 0.01², à l'intrados et à l'extrados, pour 4 sections
(Appui, clef, 2 intermédiaires)
des abaissements de la clef.
Courbe des intersections des réactions
Ligne d'influence des abaissements de la clef 1mm pour 0mm 005
Ligne d'influence de la poussée horizontale H 33mm pr 1T Ordonnées du funicre 5 (Planche II) divisées par Λ = 12m 48
Enveloppe des réactions (Appui de gauche)
Enveloppe des réactions (Appui de droite)
Ligne d'influence des βi
Ligne d'influence des βe
- Tension
+ compression
On a "hachuré" les régions pour lesquelles la résultante est dans le noyau central
Echelles
Longueurs 1mm pour 0m30
βi et βe 33mm pour 1K
2e locomotive
1ère locomotive
20.00
20.00

§ 2. — *SOUS DEUX LOCOMOTIVES DE 160ᵀ*

(Train-type du règlement du 8 Janvier 1915)



On dessine les machines à l'échelle de l'épure ; on les déplace sur les horizontales de base des lignes d'influence ; pour chaque position, on ajoute les ordonnées correspondant aux essieux, multipliées par le poids des essieux ; on cherche pour chaque section la position des machines qui produit les plus grands efforts.

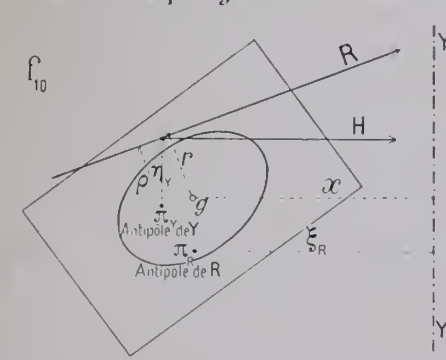
On admet que la surcharge s'étale au niveau de la plate-forme sur une bande de 4ᵐ, c'est-à-dire que le 1/4 de la surcharge porte sur un anneau de 1ᵐ.

TABLEAU IX. — *Maximum et minimum des efforts* β_i, β_e $(Kg.\ \overline{0^m01}^2)$

Sections	β_i MAXIMUM	β_i MINIMUM	β_e MAXIMUM	β_e MINIMUM	Position du train allant de l'appui A (gauche) vers l'appui B (droite)
I	+ 10ᵏ7			— 8ᵏ5	Le 1ᵉʳ essieu de la 1ʳᵉ locomotive à 14ᵐ00 de A
		— 10ᵏ0			— 2ᵉ — 36.00 —
			+ 12ᵏ5		— 2ᵉ — 34.50 —
II	+ 6ᵏ8			— 3ᵏ6	— 1ʳᵉ — 19.50 —
		— 1ᵏ7	+ 4ᵏ5		— 2ᵉ — 39.00 —
III	+ 12ᵏ2			— 7ᵏ3	— 2ᵉ — 37.00 —
		— 8ᵏ9	+ 11ᵏ9		— 1ʳᵉ — 17.00 —
IV	+ 4ᵏ4				Une seule locomotive : Le 1ᵉʳ essieu à 16ᵐ50 de A
				— 2ᵏ3	— 14.50 —
		— 6ᵏ0	+ 11ᵏ1		Le 3ᵉ essieu sur la clef

§ 3. — *DÉPLACEMENTS VERTICAUX DE LA CLEF AU PASSAGE DU TRAIN D'ÉPREUVE*

Soit R la résultante des actions sur une tranche. Elle déplace verticalement le centre élastique $\mathcal{G}$ de :



$$\Delta Y = \frac{R r \varphi \xi_R}{E}$$

Mais le moment centrifuge $r\xi_R$ peut s'écrire ρx ; on a d'ailleurs

$$R\rho = H\eta_Y \qquad \text{D'où : } \quad \Delta Y = \frac{H}{E}\,\eta_Y x \varphi$$

et pour l'ensemble des tranches, de l'appui A à la clef :

$$\varpi b = \frac{H}{E} \sum_{A}^{\text{Clef}} \eta_Y x \varphi \qquad E = 2.5 \times \overline{10}^{9}$$

TABLEAU X. — *Abaissement de la clef, lorsque la surcharge* 1^T *occupe les positions* **a. b. c. d. e.** (Pl. IV)

Nos d'ordre	φ (*Tab. I. col 6*)	Abscisses des centres de gravité (*Tabl. III, col. 3*) x	φ.x	A la clef a Ordonnée de l'antipôle η	A la clef a φ.x η	A 6m12 de la clef b η	A 6m12 de la clef b φ.x η	A 12m05 de la clef c η	A 12m05 de la clef c φ.x η	A 17m51 de la clef d η	A 17m51 de la clef d φ.x η	A 22m41 de la clef e η	A 22m41 de la clef e φ.x η
1	10.4270	1m54	16.1	+ 1m20	+ 19.3	— 0m40	— 6.4	— 1m20	— 19.3	— 1m60	— 25.8	— 1m75	— 28.2
2	9.9825	4.61	46.0	+ 0.27	+ 12.4	— 0.95	— 43.7	— 1.55	— 71.3	— 1.83	— 84.2	— 1.90	— 87.4
3	9.1455	7.64	69.9	— 0.45	— 31.5	— 1.30	— 90.9	— 1.65	— 115.3	— 1.80	— 125.8	— 1.83	— 127.9
4	8.0583	10.62	85.6	— 0.90	— 77.0	— 1.35	— 115.6	— 1.48	— 126.6	— 1.50	— 128.4	— 1.47	— 125.8
5	6.9782	13.50	94.2	— 1.06	— 99.9	— 1.12	— 105.5	— 1.00	— 94.2	— 0.90	— 84.7	— 0.80	— 75.4
6	5.7437	16.24	93.3	— 0.90	— 84.0	— 0.57	— 53.2	— 0.26	— 24.3	— 0.05	— 4.7	+ 0.12	+ 11.2
7	4.6265	18.85	87.2	— 0.42	— 36.6	+ 0.25	+ 21.8	+ 0.77	+ 67.1	+ 1.15	+ 100.3	+ 1.35	+ 117.7
8	3.6973	21.28	78.7	+ 0.34	+ 26.8	+ 1.40	+ 110.2	+ 2.10	+ 165.3	+ 2.53	+ 199.1	+ 2.80	+ 220.4
9	2.8967	23.53	68.2	+ 1.44	+ 98.2	+ 2.80	+ 191.0	+ 3.70	+ 252.3	+ 4.21	+ 287.1	+ 4.50	+ 306.9
				$\Sigma \varphi . x \eta =$	— 172.3		— 92.3		+ 33.7		+ 132.9		+ 211.5
Valeurs de **H** correspondant aux 5 positions de la charge. (*Tableau V*)					H = 1.132		0.974		0.602		0.230		0.025
Abaissement de la clef $\frac{H}{2,5} \cdot \frac{\Sigma \varphi . x \eta}{1000}$					— 0.078 mm		— 0.035 mm		+ 0.008 mm		+ 0.012 mm		+ 0.002 mm
Pour un poids concentré de 100^T sur une largeur de 4m74, soit 20^T					— 1.56 mm		— 0.72 mm		+ 0.16 mm		+ 0.24 mm		+ 0.04 mm

CHAPITRE IV

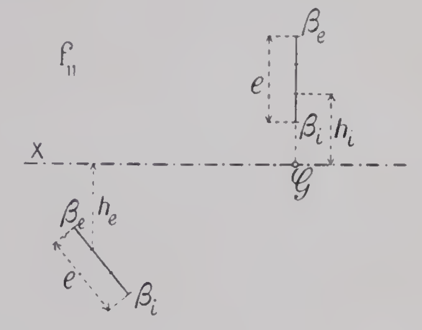
EFFET D'UN CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE DE τ°

Art. 1. — Augmentation de travail.

A un changement de température correspond [13] une translation qui est ici horizontale, donc parallèle à l'axe $\mathcal{G}$ X de l'ellipse élastique ; la droite conjuguée est l'autre axe $\mathcal{G}$ X. La réaction de l'appui est suivant l'axe $\mathcal{G}$ X

$$H_\tau \text{ (en T)} = \frac{2a' \begin{pmatrix}\text{portée}\\ \text{en } 0.01\end{pmatrix} \text{E} \left(\text{en T } \overline{0.01}^2 = 250\right) \times \alpha \left(\frac{8}{10^6}\right)}{\overset{B}{\underset{A}{I}}{}_{X^2} \begin{pmatrix}\text{Moment d'inertie des}\\ \varphi \text{ par rapport à } \mathcal{G}X\end{pmatrix}} \tau \quad [14]$$

$2a' = 4914^c \qquad \overset{B}{\underset{A}{I}}{}_{X^2} = 9.88$ (tabl. IV, col. 5) $\qquad H_\tau = 0.995\ \tau$



On trouve, pour un abaissement de température de τ°, une augmentation d'effort de (p. 155) :

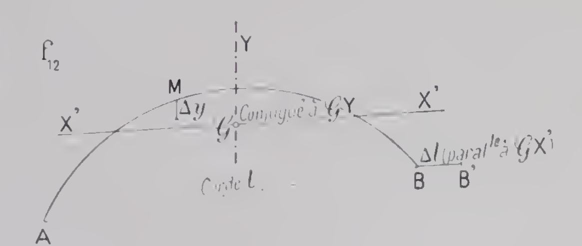
$$\text{A } l'intrados \text{ de la retombée } \beta_i = \frac{h_e \times 0.995 = 820^c \times 995}{1.056.000} \tau = +\ 0.77\ \tau$$

$$\text{A } l'extrados \text{ de la clef } \beta_e = \frac{h_i\ (220^c) \times 995}{386\ 000} \tau = +\ 0.57\ \tau$$

Art. 2. — Déplacements verticaux.

Les ordonnées de la ligne d'influence de la poussée (Pl. IV) représentent à une certaine échelle, les déplacements verticaux dus à une variation de température (M. Guidi) [15].

En effet, une variation de température τ produit une poussée H_τ suivant $\mathcal{G}$ X', laquelle déplace verticalement le point M (fig. 12) de :



$$\Delta y = H_\tau\ \psi\ p''\ p^{V} \qquad \text{(p. 138)}$$

La poussée H_τ correspond à une variation de longueur $\Delta l = \alpha\ \tau l$ de la corde l :

$$\Delta l = H_\tau\ I_{X'^2}\ ^{16} = H_\tau \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} p''\ p^{IV}\ ^{17} = H_\tau\ p''\ p^{V} \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\ ^{18}$$

On a donc :

$$\frac{\Delta y}{\Delta l} = \frac{\psi}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} = \text{H (ordonnée du funiculaire } \mathbf{5})$$

$$\Delta y = \text{H } \Delta l$$

13. — p. 131. 14. — p. 144.
15. — « *Una proprietà degli archi elastici* », Turin 1905.
16. — Art. 1 ci-dessus. 17. — p. 137. 18. — p. 139.

CHAPITRE V

EFFORTS RÉSULTANTS

	Section I appui			Section II		Section III			Section IV clef	
	Intr.	Extrados		Intr.	Extr.	Intrados		Extr.	Intr.	Extr.
Poids mort (p. 155 § 5).....	$+17^{k}7$	$+5^{k}8$	$+5^{k}8$	$+16^{k}8$	$+7^{k}8$	$+8^{k}4$	$+8^{k}4$	$+17^{k}8$	$+19^{k}9$	$+8^{k}5$
Au passage de 2 machines (p. 157 tableau IX)......	+ 10.7	+ 12.5	— 8.5	+ 6.8	+ 4.5	+ 12.2	— 8.9	+ 11.9	+ 4.4	+ 11.1
Ensemble.	$+28^{k}4$	$+18^{k}3$	$-2^{k}7$	$+23^{k}6$	$+12^{k}3$	$+20^{k}6$	$-0^{k}5$	$+29^{k}7$	$+24^{k}3$	$+19^{k}6$
A ajouter pour un changement de température de 20°................	$+15^{k}4$									$+11^{k}4$
Total.	$+43^{k}8$									$+31^{k}0$

TITRE V

VÉRIFICATION GROSSIÈRE DES ÉPURES D'UNE VOÛTE

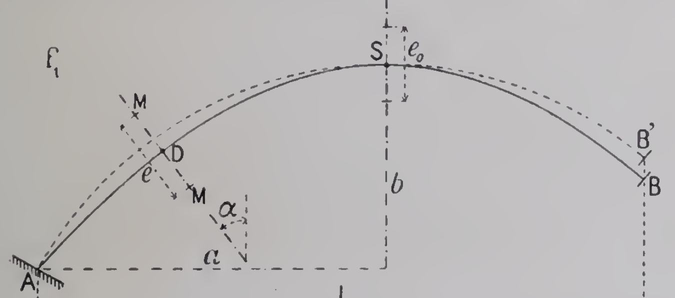
Comparaison avec celles faites pour une voûte dont la fibre moyenne est une parabole ADSB[1] de même portée L et même montée b, et pour laquelle le moment d'inertie I d'une section MM inclinée de α sur la verticale

$$= \frac{I_0 \begin{pmatrix}\text{moment}\\ \text{à la clef}\end{pmatrix}}{\cos\alpha} = I_0 \frac{ds}{dx} (\Gamma_1).^2$$

CHAPITRE I

HYPOTHÈSES

Dans tout ce qui va suivre, on supposera donc que la fibre moyenne est une parabole[3], puis que le moment d'inertie I d'une section MM a une projection verticale constante. Si la voûte a une largeur uniforme,



$$e = \frac{e_0}{\sqrt[3]{\cos\alpha}}$$

On a fait quelques voûtes à projection verticale constante :

$$e = \frac{e_0}{\cos\alpha}.^4$$

Pour les ellipses et les arcs, l'épaisseur e ainsi définie est au-dessous des épaisseurs usuelles des voûtes en pierre. Elle l'est encore bien plus avec la formule $\dfrac{e_0}{\sqrt[3]{\cos\alpha}}$.

Plus loin, dans le calcul des moments d'inertie et centrifuges, on fera encore cette nouvelle hypothèse, que, pour chaque tranche, les rotations $\Delta\theta$ se font autour du centre de gravité et non d'un antipôle : c'est négliger les raccourcissements dus à l'effort normal devant les rotations dues au couple de flexion.

Grâce à toutes ces hypothèses, on calcule et on construit très vite les réactions des appuis dues aux charges, la ligne des intersections de ces réactions et leur enveloppe.

Sans doute, ce ne sont pas celles de la voûte réelle, mais elles les contrôlent fort utilement et garantissent des grosses erreurs, en particulier des erreurs d'échelle.

1. — Pont en béton armé de Langwies, ligne de Coire à Arosa (Suisse). Fibre moyenne de 100m de portée, 42m de montée, voisine d'une parabole. (*Schweizerische Bauzeitung* — *22 novembre 1913*).

2. — Ces arcs ont été étudiés par Culmann « *Die graphische Statik* », 2e édition, Zurich, 1875, p. 598 et suivantes. Traduction française de MM. Glasser, Jacquier et Valat — Paris 1880, p. 553 et suivantes.

3. — III, p. 365 — Sur une fibre moyenne en parabole, funiculaire des charges, la ligne de charge est une parabole.

4. — III, p. 344, 346.

CHAPITRE II

ARC PARABOLIQUE DISSYMÉTRIQUE (Pl. V).

§ 1. — *ELLIPSE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Poids élastiques.

φ (poids élastique d'une tranche ds) $= \dfrac{ds}{EI} = \dfrac{dx}{EI_0}$

$\overset{B}{\underset{A}{\Phi}}$ (somme des poids élastiques de l'arc) $= \displaystyle\int_0^L \varphi = \frac{L}{EI_0}$

Art. 2. — Centre élastique $\mathcal{G}$.

$$X_{\mathcal{G}} \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} = \int_0^L \varphi X = \frac{1}{EI_0}\int_0^L X\,dX = \frac{L^2}{2EI_0} \qquad X_{\mathcal{G}} = \frac{L}{2}$$

$$Y_{\mathcal{G}} \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} = \int_0^L \varphi Y = \frac{1}{EI_0}\int_0^L \frac{b}{a^2} X(2a - X)\,dX = \frac{b}{3EI_0 a^2}(3a - L)\,L^2$$

$$Y_{\mathcal{G}} = O\mathcal{G} = \frac{b(3a - L)\,L}{3a^2} \qquad O'\mathcal{G} = O\mathcal{G} - OO' = \frac{bL^2}{6a^2} = \frac{2}{3}\,b'$$

Le centre élastique est sur la verticale OC du milieu de AB′, à $\dfrac{b'}{3}$ au-dessous de C.

Art. 3. — Diamètre conjugué à la verticale $\mathcal{G}y$.

A. — Moment d'inertie des φ par rapport à $\mathcal{G}y$.

$$I_{y^2} = I_{Y^2} - \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} X_{\mathcal{G}}^2 \overset{[5]}{=} \int_0^L X^2\varphi - \frac{L^3}{4EI_0} = \frac{L^3}{12EI_0} = j_y^2 \overset{B}{\underset{A}{\Phi}}, \qquad j_y^2 = \frac{L^2}{12}$$

Par rapport à $\mathcal{G}y$, le rayon de gyration est celui d'un rectangle de longueur L.

B. — Direction $\mathcal{G}x'$ conjuguée à la verticale $\mathcal{G}y$.

C'est la droite qui passe par $\mathcal{G}$ et par l'antipôle d'une verticale quelconque, par exemple l'antipôle $\pi(\xi, \eta)$ de AY.

$$\overset{B}{\underset{A}{\Phi}} X_{\mathcal{G}}\,\xi_Y = I_{Y^2}\ [6] \qquad \xi_Y = \frac{2}{3}L \qquad \xi_y = \xi_Y - \frac{L}{2} = \frac{L}{6}$$

$$\overset{B}{\underset{A}{\Phi}} X_{\mathcal{G}}\,\eta_X = I_{XY} = \frac{1}{EI_0}\,\frac{b}{a^2}\int_0^L X^2(2a - X)\,dX = \frac{bL^3(8a - 3L)}{12EI_0 a^2}$$

$$\eta_X = \frac{bL(8a - 3L)}{6a^2} \qquad \eta_x = \eta_X - Y_{\mathcal{G}} = \frac{bL(2a - L)}{6a^2} = \frac{Y_1}{6} \quad \left(\begin{array}{c}Y_1 \text{ ordonnée} \\ \text{BB}' \text{ de l'appui B}\end{array}\right)$$

$$\text{Tang}\,\gamma = \frac{\eta_x}{\frac{L}{6}} = \frac{b(2a - L)}{a^2} = \frac{Y_1}{L}$$

$\mathcal{G}x'$ conjugué à $\mathcal{G}y$ est parallèle à la corde AB, à $\dfrac{b'}{3}$ au-dessous de C.

C. — Longueur de l'axe a″ conjugué à la verticale.

$$a''^2 \cos^2\gamma = j_y^2 = \frac{L^2}{12} \qquad a''\cos\gamma = j_y = \frac{L\sqrt{3}}{6}$$

Art. 4. — Axe vertical b″

A. — Moment d'inertie des φ par rapport à $\mathcal{G}x'$.

$$I_{x'^2} = \int_0^L \varphi y'^2 = \frac{1}{EI_0}\int_0^L y'^2 dx \qquad y' = Y - Y_{\mathcal{G}} - (X - X_{\mathcal{G}})\,\text{tang}\,\gamma$$

On a donné plus haut Y en X, $Y_{\mathcal{G}}$, $X_{\mathcal{G}}$, tang γ : on trouve

$$I_{x'^2} = \frac{b^2 L^5}{180\,EI_0 a^4}$$

5. — p. 121. 6. — p. 122.

B. — Axe vertical b″ conjugué à a″.

$$\Phi b''^2 = I_{x''^2}$$

$$b''^2 = \frac{b^2 L^4}{180 a^4} \qquad b'' = \frac{b L^2}{6a^2 \sqrt{5}} = \frac{2b' \sqrt{5}}{15}$$ [7]

Art. 5. — Intersections de l'ellipse élastique et de la fibre moyenne.

Le diamètre $\mathcal{G}x'$, $Y = \dfrac{b L^2}{6a^2} + X \text{ tang.}\, \gamma$ coupe la fibre moyenne aux points :

$$X = \frac{L}{2} \pm \frac{L\sqrt{3}}{6} = \frac{L}{2} \pm j_y$$

c'est-à-dire aux sommets de l'ellipse élastique sur l'axe $\mathcal{G}x'$.

§ 2. — *RÉACTIONS* R^B, R^A *DES APPUIS* B *ET* A *DUES A UNE CHARGE VERTICALE* V *A* v *DE L'APPUI* A

Art. 1. — Moment statique des φ par rapport à V. Funiculaire 1.

$$\mathfrak{M}^V_A(\varphi) = \int_0^v \varphi\,(v - X) = \frac{1}{E I_0}\int_0^v (v - X)\, dX = \frac{v^2}{2 E I_0}$$

$$= Z^B_1 \left(\text{ordonnée du funiculaire } \mathbf{1},\ \overset{V}{\underset{A}{\Gamma}} \text{ de la Pl. I}\right) \times p' \left(\text{distance polaire de } \mathbf{1} = \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} = \frac{L}{E I_0}\right)$$

$$Z^B_1 = \frac{v^2}{2L}$$

De même :

$$\mathfrak{M}^B_V(\varphi) = \frac{1}{E I_0}\int_V^L (X - v)\, dX = \frac{1}{E I_0}\,\frac{(L - v)^2}{2} = Z^A_1\, p' \qquad Z^A_1 = \frac{(L - v)^2}{2L}$$

Art. 2. — Moment centrifuge des φ par rapport à V et à $\mathcal{G}y$. Funiculaire 3.

$$\overset{V}{\underset{A}{I}}{}_{Vy} = \int_0^V \varphi\,(v - X)\left(X_{\mathcal{G}} - X\right) = \frac{v^2 (3L - 2v)}{12 E I_0}$$

$$= Z^B_3 \left(\text{ordonnée du funiculaire } \mathbf{3},\ \overset{V}{\underset{A}{\Lambda}} \text{ de la Pl. II}\right) \times p' \left(\text{distance polaire de } \mathbf{1} = \frac{L}{E I_0}\right) \times p''' \left(\text{distance polaire de } \mathbf{3} = \frac{L}{4}\right)$$

$$Z^B_3 = \frac{v^2 (3L - 2v)}{3L^2} \qquad Z^A_3 = \frac{(L - v)^2 (L + 2v)}{3L^2}$$

7. — Voici à titre de simple vérification, la direction des axes principaux :

$$I_{y^2} \text{ (Art. 3)} = \frac{L^3}{12 E I_0}$$

Direction du grand axe

$$I_{x^2} = I_{X^2} - \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} Y^2_{\mathcal{G}} = \int_0^L Y^2 \varphi - \frac{L}{E I_0} Y^2_{\mathcal{G}}$$

$$= \frac{b^2}{E I_0\, a^4}\int_0^L X^2 (2a - X)^2\, dx - \frac{L}{E I_0} Y^2_{\mathcal{G}}$$

$$= \frac{b^2 L^3}{45 E I_0\, a^4}\left[4 (2a - L)^2 + a (L - a)\right] = j_x^2 \frac{L}{E I_0} \qquad \text{d'où } j_x$$

$$I_{xy} = I_{XY} - \Phi X_{\mathcal{G}} Y_{\mathcal{G}} = \frac{b L^3}{12 E I_0\, a^2}(2a - L)$$

$$\text{Tang. } 2\alpha \text{ (p. 119)} = \frac{2 I_{xy}}{I_{y^2} - I_{x^2}} = \frac{2b (2a - L)}{a^2 - \dfrac{4b^2}{15 a^2}\left[4 (2a - L)^2 + a (L - a)\right]}$$

courbe en S, symétrique par rapport à F

$$\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}\, y^2 = \frac{L^3}{12\,EI_0} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\, p'p''' = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\, \frac{L}{EI_0}\,\frac{L}{4} \qquad \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \frac{L}{3}$$

Art. 3. — Moment centrifuge des φ par rapport à V et à 𝒢x'. Funiculaire 5.

$$\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{Vx'} = \int_0^V \varphi\,(v - X)\,y' \qquad y' = Y - Y_{\mathcal{G}} - \left(X - X_{\mathcal{G}}\right) \text{ tang. } \gamma$$

On a donné plus haut Y en X, $Y_{\mathcal{G}}$, $X_{\mathcal{G}}$, tang. γ : on trouve

$$\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{Vx'} = \frac{bv^2\,(L - v)^2}{12\,EI_0\,a^2} = Z_5 \left(\text{ordonnée du funiculaire } \mathbf{5},\ \overset{V}{\underset{A}{\Psi}} \text{ de la Pl. II}\right)$$

$$\times\, p'' \text{ (distance polaire de } \mathbf{2}) \times p^{V} \left(\text{distance polaire de } \mathbf{5},\ \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} \text{ de la Pl. II}\right)$$

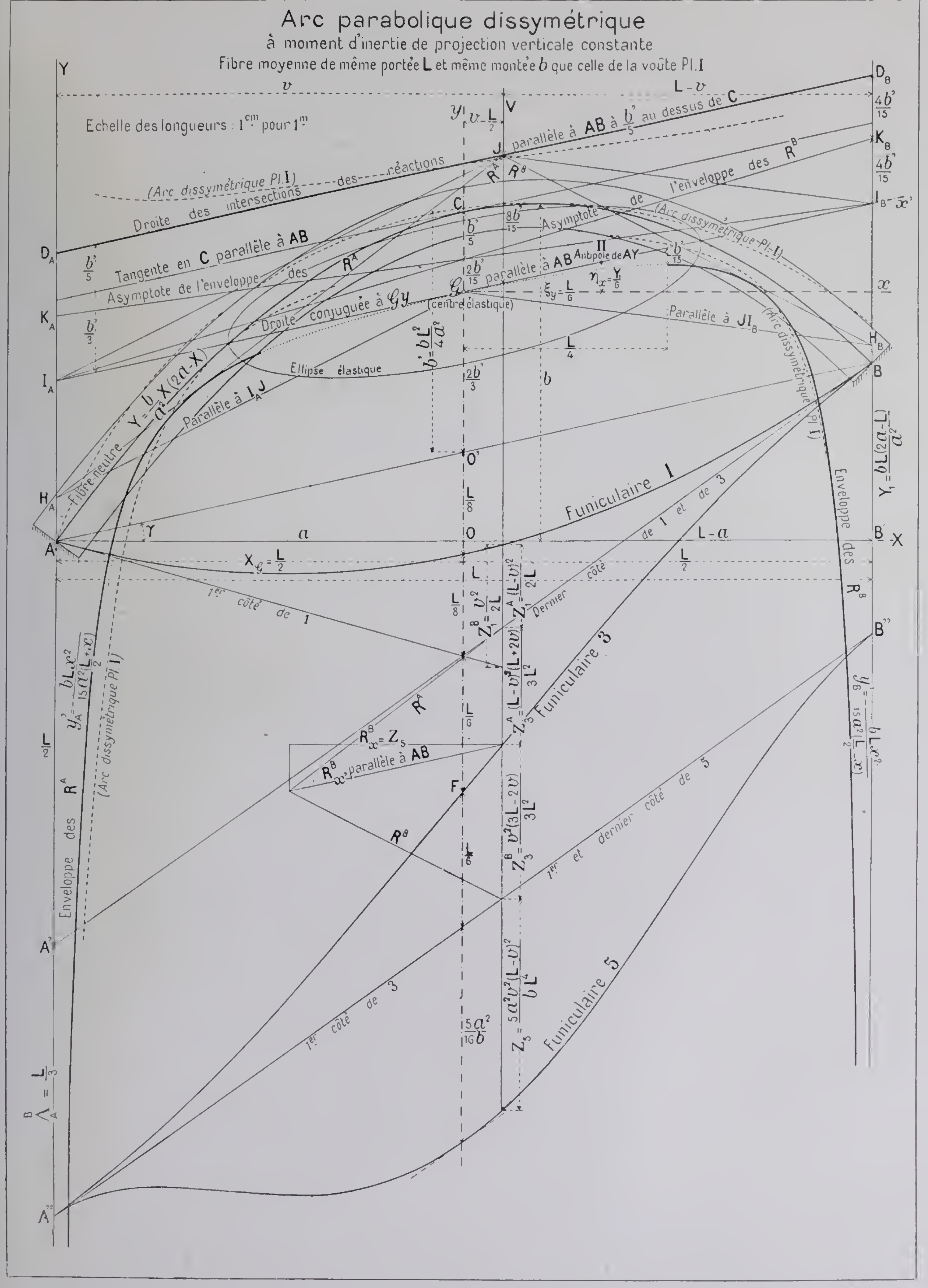
$$\text{Or} \qquad \overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}\, x'^2 = \frac{b^2\,L^5}{180\,EI_0\,a^4} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}\, p''p^{IV} \left(\text{distance polaire de } \mathbf{4} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \frac{L}{3}\right) = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}\, p''\,\frac{L}{3}$$

$$Z_5 = \frac{5\,a^2v^2\,(L - v)^2}{bL^4}$$

courbe en chapeau de gendarme — même Z_5 à même distance de part et d'autre de 𝒢y.

Art. 4. — Réactions des appuis.

	Appui B	Appui A
Moment de R par rapport au centre élastique $\frac{Rr}{V}$	$\dfrac{\overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}(\varphi)}{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}}\varphi} = \dfrac{\frac{1}{EI_0}\frac{v^2}{2}}{\frac{L}{EI_0}} = \dfrac{v^2}{2L} = \overset{B}{Z_1}$	$\dfrac{\overset{B}{\underset{V}{\mathfrak{M}}}(\varphi)}{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}}\varphi} = \dfrac{\frac{1}{EI_0}\frac{(L-v)^2}{2}}{\frac{L}{EI_0}} = \dfrac{(L-v)^2}{2L} = \overset{A}{Z_1}$
Projection verticale de R $\frac{R_y}{V}$	$\dfrac{\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{vy}}{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{y^2}} = \dfrac{\frac{v^2(3L-2v)}{12EI_0}}{\frac{1}{EI_0}\frac{L^3}{12}} = \dfrac{v^2(3L-2v)}{L^3} = \dfrac{\overset{B}{Z_2}}{\frac{L}{3}}$	$\dfrac{\overset{B}{\underset{V}{\mathrm{I}}}_{vy}}{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{y^2}} = \dfrac{\frac{(L-v)^2(L+2v)}{12EI_0}}{\frac{1}{EI_0}\frac{L^3}{12}} = \dfrac{(L-v)^2(L+2v)}{L^3} = \dfrac{\overset{A}{Z_2}}{\frac{L}{3}}$
Projection horizontale de R (poussée horizontale, la même pour les 2 appuis) $\frac{R_x}{V}$	$\dfrac{\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{vx'}}{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}_{x'^2}} = \dfrac{\frac{bv^2(L-v)^2}{12EI_0a^2}}{\frac{b^2L^5}{180EI_0a^4}} = \dfrac{15v^2(L-v)^2a^2}{bL^5} = \dfrac{Z_5}{\frac{L}{3}}$	
Projection horizontale de l'abscisse à l'origine sur 𝒢x' $m\cos\gamma = \frac{Rr}{R_y}$	$\dfrac{L^2}{2(3L-2v)}$	$-\dfrac{L^2}{2(L+2v)}$
Ordonnée à l'origine sur 𝒢y $n = \frac{Rr}{R_x}$	$\dfrac{bL^4}{30a^2(L-v)^2}$	$\dfrac{bL^4}{30a^2v^2}$
Équation de la ligne d'action de la réaction rapportée à 𝒢x', 𝒢y.	$\dfrac{30a^2}{bL^2}(L-v)^2y' + 2(3L-2v)x = L^2$	$\dfrac{30a^2}{bL^2}v^2y' - 2(L+2v)x = L^2$


Arc parabolique dissymétrique
à moment d'inertie de projection verticale constante
Fibre moyenne de même portée L et même montée b que celle de la voûte Pl. I
Echelle des longueurs : 1cm pour 1m
parallèle à AB à b'/5 au dessus de C
(Arc dissymétrique Pl. I)
Droite des intersections des réactions
Tangente en C parallèle à AB
Asymptote de l'enveloppe des R^A
Asymptote de l'enveloppe des R^B
(Arc dissymétrique Pl. I)
parallèle à AB
Antipole de AY
Droite conjuguée à Gy
(centre élastique)
Parallèle à JI_B
Ellipse élastique
Parallèle à I_A J
Fibre neutre
Funiculaire 1
Funiculaire 3
Funiculaire 5
Enveloppe des R^B
Enveloppe des R^A
1er côté de 1
Dernier côté de 1 et de 3
1er et dernier côté de 5
1er côté de 3
R^B_x parallèle à AB
R^B_x = Z_5
(Arc dissymétrique Pl. I)
(Arc dissymétrique Pl. I)

Art. 5. — Ligne des intersections des réactions.

R^B, R^A coupent V au point d'ordonnée $y' = \frac{2bL^2}{15a^2} = \frac{8b'}{15}$, indépendant de v.

La ligne des intersections des réactions est une droite parallèle à $\mathcal{G}x'$ c'est-à-dire à AB, à $\frac{8b'}{15}$ au-dessus de $\mathcal{G}$, $\frac{b'}{5}$ au-dessus de C.

R^B rencontre $D_B B$ au point H_B d'ordonnée $I_B H_B = -\frac{bL^3}{15a^2(L-v)}$.

Joignons JI_B, puis menons $\mathcal{G}H_B$ parallèle à JI_B

$$I_B H_B = D_B I_B \frac{\frac{L}{2}}{L-v} = \frac{bL^3}{15a^2(L-v)}$$

On a de même R^A en joignant JI_A et menant GH_A parallèle à JI_A.

On vérifie que R^A, R^B sont parallèles à celles qui résultent des funiculaires **3** et **5**.

On construit ainsi très facilement les réactions sans tracer leur enveloppe.

Art. 6. — Enveloppe des réactions.

Rapportée à $\mathcal{G}x'$, $\mathcal{G}y$, l'enveloppe des R^B est $y'_B = -\frac{bLx^2}{15a^2\left(\frac{L}{2} - x\right)}$, hyperbole passant par $\mathcal{G}$, tangente en $\mathcal{G}$ à $\mathcal{G}x'$; une asymptote est la verticale de l'appui B $\left(x = \frac{L}{2}\right)$; l'autre $y' = \frac{bL}{15a^2}\left(x + \frac{L}{2}\right)$ coupe $\mathcal{G}y$ à $\frac{bL^2}{30a^2} = \frac{2b'}{15}$ au-dessus de $\mathcal{G}$ et passe par I_A et par K_B milieu de $D_B I_B$.

On construit l'enveloppe en traçant quelques réactions comme l'indique l'article 5 ; elles la touchent au milieu du segment intercepté sur elles par les deux asymptotes.

L'enveloppe de R^A est l'hyperbole symétrique $y'_A = -\frac{bLx^2}{15a^2\left(\frac{L}{2} + x\right)}$ dont les asymptotes sont :

$$x = -\frac{L}{2} \qquad \text{et} \qquad y' = -\frac{bL}{15a^2}\left(x - \frac{L}{2}\right).$$

Quand V est sur l'appui A, la réaction R_0^B (la première de l'appui B) laquelle est nulle, coupe $\mathcal{G}y$ à $\frac{bL^2}{30a^2} = \frac{2b'}{15}$ au-dessus de $\mathcal{G}$, $\mathcal{G}x'$ à $\frac{L}{6}$ à droite de $\mathcal{G}$. Elle touche l'enveloppe au point $x = \frac{L}{4}$, $y = -\frac{bL^2}{60a^2} = -\frac{b'}{15}$. La partie de l'enveloppe à gauche est parasite.

§ 3. — *COMPARAISON AVEC LA VOÛTE RÉELLE DE MÊME PORTÉE ET MÊME MONTÉE*

Sur la planche V on a tracé en traits discontinus les lignes construites pour la voûte réelle (Pl. I) : courbe des intersections des réactions, leur enveloppe.

ARC PARABOLIQUE SYMÉTRIQUE DE PORTÉE $2a$ (Pl. VI)

(Dans les formules de l'arc dissymétrique, on fera L $= 2a$*)*

§ 1. — *ELLIPSE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Centre.

Il est sur l'axe vertical, au tiers de la montée b au-dessous de la clef.

Art. 2. — Longueur des axes.

$$a'' \text{ (axe horizontal)} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

c'est celui d'un rectangle de longueur $2a''$

$$b'' \text{ (axe vertical)} = \frac{2b\sqrt{5}}{15}$$

Art. 3. — Intersections de l'ellipse élastique et de la fibre moyenne.

L'ellipse élastique $\dfrac{x^2}{\frac{a^2}{3}} + \dfrac{y^2}{\frac{4b^2}{45}} = 1$ coupe la fibre moyenne $y = b\left(\dfrac{1}{3} - \dfrac{x^2}{a^2}\right)$ aux points :

$$x = \pm \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad y = 0 \quad \text{c'est-à-dire à ses deux sommets sur } \mathcal{G}x$$

$$x = \pm \frac{a}{\sqrt{15}}, \quad y = \frac{4b}{15}$$

§ 2. — *RÉACTIONS* R^B, R^A *DES APPUIS* B *ET* A

DUES A UNE CHARGE VERTICALE V, *A* v *DE L'APPUI* A

Art. 1. — Moment statique des φ par rapport à V. Funiculaire 1.

Avec $\quad p' = \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} = \dfrac{2a}{EI_0}, \quad$ on a $\quad$ (p. 163, art. 1) :

$$Z_1^B = \frac{v^2}{4a^2}, \qquad Z_1^A = \frac{(2a - v)^2}{4a}$$

Art. 2. — Moment centrifuge des φ par rapport à V et à $\mathcal{G}y$. Funiculaire 3.

Avec $\quad p'' = \dfrac{a}{2}, \quad$ soit $\quad \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \dfrac{2a}{3}, \quad$ on a $\quad$ (p. 163, art. 2) :

$$Z_3^B = \frac{v^2(3a - v)}{6a^2} \qquad Z_3^A = \frac{(2a - v)^2(a + v)}{6a^2}$$

Art. 3. — Moment centrifuge des φ par rapport à V et à $\mathcal{G}x$. Funiculaire 5.

Avec $\quad p^{IV} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \dfrac{2a}{3}, \qquad p^{V} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}, \quad$ on trouve $\quad$ (p. 164, art. 3) :

$$Z_5 = \frac{5}{16}\,\frac{v^2(2a - v)^2}{a^2 b}$$

Art. 4. — Réactions R^A R^B (p. 164 art. 4).

	Appui B	Appui A
Moment de R par rapport au centre élastique $\frac{Rr}{V}$	$\frac{v^2}{4a} = Z_1^B$	$\frac{(2a-v)^2}{4a} = Z_1^A$
Projections de R — verticale $\frac{R_y}{V}$	$\frac{v^2(3a-v)}{4a^3} = \frac{Z_3^B}{\frac{2a}{3}}$	$\frac{(2a-v)^2(a+v)}{4a^3} = \frac{Z_3^A}{\frac{2a}{3}}$
Projections de R — horizontale $\frac{R_x}{V}$	$\frac{15v^2(2a-v)^2}{32ba^3} = \frac{Z_5}{\frac{2a}{3}}$	
Coordonnées à l'origine $\mathcal{G}$ — sur $\mathcal{G}x$ $m =$	$\frac{a^2}{3a-v}$	$-\frac{a^2}{a+v}$
Coordonnées à l'origine $\mathcal{G}$ — sur $\mathcal{G}y$ $n =$	$\frac{8ba^2}{15(2a-v)^2}$	$\frac{8ba^2}{15v^2}$
Equation de la ligne d'action de R rapportée à $\mathcal{G}x$, $\mathcal{G}y$	$\frac{15}{8b}(2a-v)^2 y + (3a-v)x = a^2$	$\frac{15v^2}{8b} y - (a+v)x = a^2$

Art. 5. — Ligne des intersections des réactions.

R^A, R^B coupent V sur une horizontale à $\frac{8b}{15}$ au-dessus de $\mathcal{G}$, $\frac{b}{5}$ au-dessus de la clef.

R^B rencontre DB au point H_B d'ordonnée $y = \frac{8b}{15}\,\frac{a}{2a-v}$

Joignons JL, puis menons $\mathcal{G}H_B$ parallèle à JL $\quad LH = \frac{DL \times L\mathcal{G}}{DJ} = y$

On a de même R^A.

On construit ainsi très facilement R^B, R^A sans tracer leur enveloppe.

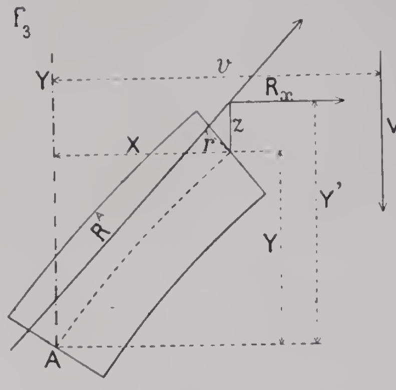
Art. 6. — Enveloppe des réactions.

L'enveloppe des R^B est l'hyperbole $\quad y_B = -\frac{2bx^2}{15a(a-x)}$

celle des R^A $\quad y_A = -\frac{2bx^2}{15a(a+x)}$

Mêmes observations que pour l'arc dissymétrique (p. 165 art. 6).

§ 3. — *MOMENT DE FLEXION* $\mathfrak{M}_F$ *DANS UNE SECTION A X DE L'APPUI DE GAUCHE DÛ A LA RÉACTION* R^A $(X \leqq v)$ f_3



$$\mathfrak{M}_F = R^A\, r = R_x\, z \text{ (distance verticale de la fibre neutre à R)}$$

$$= V\, \frac{Z_s}{\dfrac{2a}{3}} \times z$$

On a sur l'épure Z_s et z : donc $\mathfrak{M}$.

On peut aussi calculer $\mathfrak{M}$

$$R_x = V\, \frac{15 v^2\, (2a - v)^2}{32\, a^3\, b}$$

$$z = Y' - Y = \frac{2b}{15 v^2} \Big[v\,(5v - 4a) + 4\,(a + v)\, X \Big] - \frac{bX}{a^2}\,(2a - X)$$

On trouve :

$$\mathfrak{M}_F = V\, \frac{(2a - v)^2}{32 a^5} \Big[2a^2\, v\, (5v - 4a) + 2 \Big\{ (2a + v)^2 - 16 v^2 \Big\}\, aX + 15 v^2\, X^2 \Big]$$

soient $X = 2a\alpha$ $v = 2a\beta$

$$\mathfrak{M}_F = 2a\, V\, (1 - \beta)^2 \Big[\frac{\beta}{2}\,(5\beta - 2) + (1 + 2\beta - 15\beta^2)\, \alpha + 15 \beta^2\, \alpha^2 \Big]$$

$$= 2a\, V\, \gamma, \quad \gamma \text{ dépendant seulement de } \alpha \text{ et } \beta.$$

M. l'Ingénieur en Chef Mesnager a présenté à l'Académie des Sciences, le 9 Novembre 1914, un abaque très pratique donnant immédiatement γ en fonction de α et β [8].

§ 4. — *EFFET D'UN CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE DE* $\tau°$

Une élévation de $\tau°$ augmente, un abaissement de $\tau°$ diminue la poussée de (p. 159) :

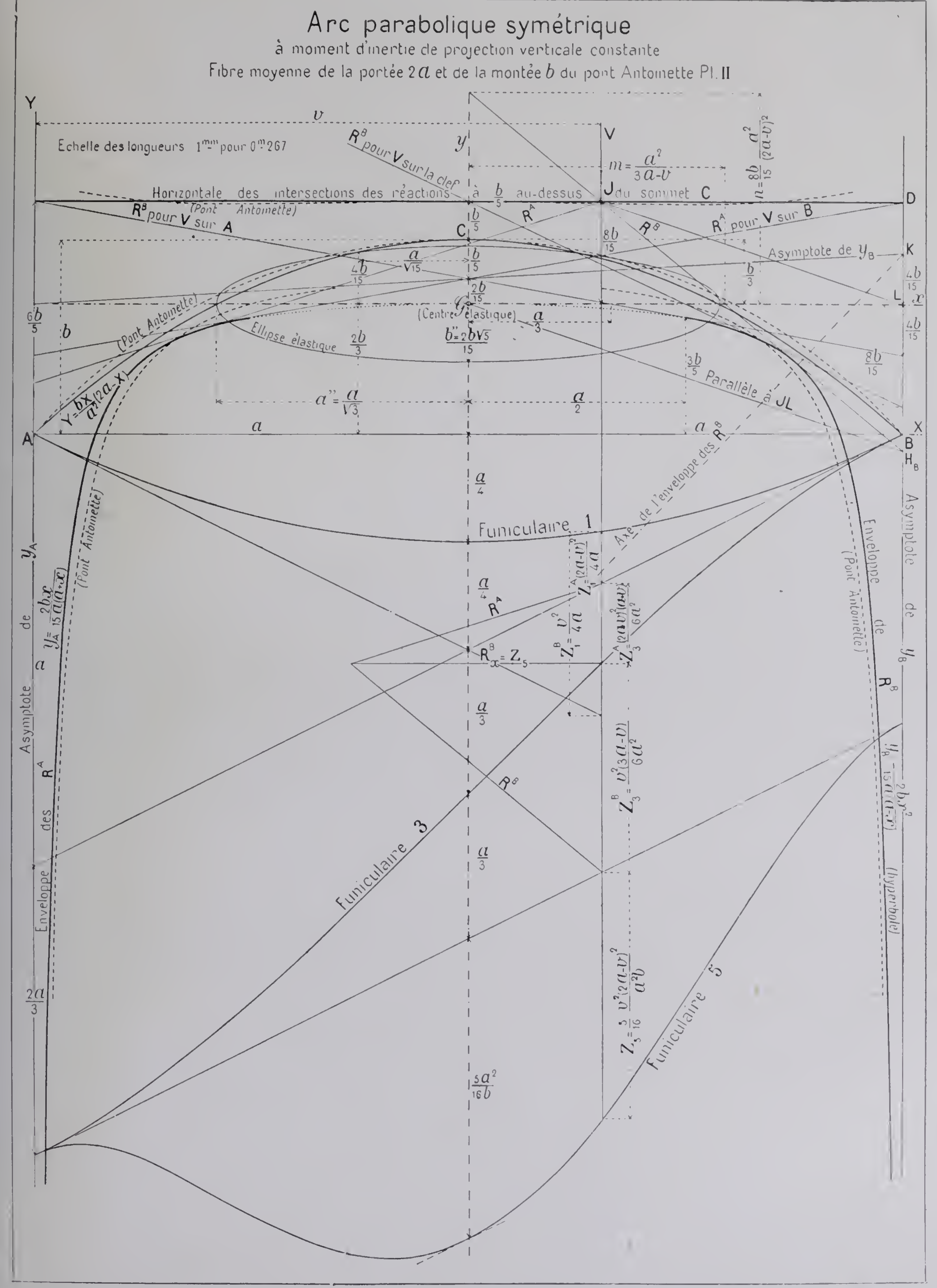
$$H_\tau \left(\begin{matrix}\text{effort en}\\ \text{tonnes}\end{matrix}\right) = \frac{2a\,(\text{portée})\, \alpha\, \tau}{\displaystyle\int_A^B x^2 = \frac{1}{E\,(\text{tonnes} / \overline{0{,}01}^2)\, I_0}\, \frac{8ab^2}{45}} = \frac{45\, E I_0\, \alpha \tau}{4 b^2}$$

§ 5. — *COMPARAISON AVEC LA VOÛTE DU PONT ANTOINETTE* (Pl. II)

La fibre moyenne de la Pl. VI est une parabole ayant la portée et la montée de celles du pont Antoinette.

On a tracé en traits discontinus les lignes de la voûte réelle construites Pl. II, la courbe des intersections des réactions, leur enveloppe.

8. — Génie civil, 1er Décembre 1914, page 458 — 6 Février 1915, page 84.


Arc parabolique symétrique
à moment d'inertie de projection verticale constante
Fibre moyenne de la portée 2a et de la montée b du pont Antoinette Pl. II
Echelle des longueurs 1mm pour 0m267
Horizontale des intersections des réactions à b/5 au-dessus du sommet C
(Pont Antoinette)
R^B pour V sur la clef
R^B pour V sur A
R^A pour V sur B
Asymptote de y_B
(Centre élastique)
Ellipse élastique
Parallèle à JL
Funiculaire 1
Funiculaire 3
Funiculaire 5
Axe de l'enveloppe des R^B
Asymptote de y_A
Enveloppe des R^A
Enveloppe de R^B
Asymptote de y_B
(Hyperbole)
(Pont Antoinette)

TITRE VI

LES APPUIS DE L'ARC NE SONT PAS INVARIABLES

§ 1. — *PRÉAMBULE*

Jusqu'ici on a supposé invariables les appuis de l'arc élastique ; s'ils ne le sont pas, les efforts calculés sont fort modifiés : par exemple,

si les appuis sont eux-mêmes élastiques (sol élastique, hautes culées élastiques, piles flexibles de hauts viaducs) ;

si les culées reculent, si les piles ou les culées s'enfoncent inégalement.

Je ne puis allonger encore cette longue étude ; je me bornerai à renvoyer aux auteurs qui ont traité ces cas.

§ 2. — *VOÛTES SUR PILES ÉLASTIQUES*

Les voûtes d'un ouvrage à plusieurs arches sont des arcs élastiques reposant sur des piles élastiques. Dans les calculs usuels, on suppose que chaque arche a ses retombées fixes ; c'est exact sous le poids mort pour des ouvrages en palier à arches égales. Mais une surcharge sur une arche l'abaisse, courbe ses 2 piles, d'autant plus flexibles qu'elles sont plus hautes, relève les arches voisines[1].

Le professeur W. Ritter a donné une méthode générale du calcul de l'arc élastique continu sur appuis élastiques, méthode élégante mais d'application fort laborieuse : elle a été exposée par M. Panetti[2], par M. Lossier[3].

M. le professeur Guidi l'applique en limitant la déformation due à une surcharge à l'arche chargée et ses deux voisines[4].

La méthode Ritter suppose que sous la surcharge, les sommets des piles s'écartent librement : ce n'est pas exact pour les ouvrages à tympans pleins, lesquels travaillent avec les voûtes[5].

1. — «..... les piles en maçonnerie ne sont pas inébranlables comme le suppose le calcul usuel, mais « fléchissent et pivotent en s'écartant de la travée chargée. Ces mouvements..... ont sur l'équilibre des « ponts à plusieurs arches une influence qu'il n'est pas permis de négliger, et telle qu'au pont du Manoir, « par exemple, un train entrant sur la première arche produit un relèvement sensible de la huitième. »
M. Rabut, *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, t. 159, p. 652. Séance du 9 novembre 1914.*

2. — « *Contributo alla trattazione grafica dell'arco continuo su appoggi elastici* ». (Turin 1901, chez Clausen).

3. — Génie civil, 3 janvier 1903, p. 153. — *Calcul des ponts en maçonnerie. Méthode de M. Ritter.*
15 août 1908, p. 268. — *Calcul des ponts en maçonnerie à plusieurs arches.*

La méthode Ritter y est simplifiée par deux hypothèses :

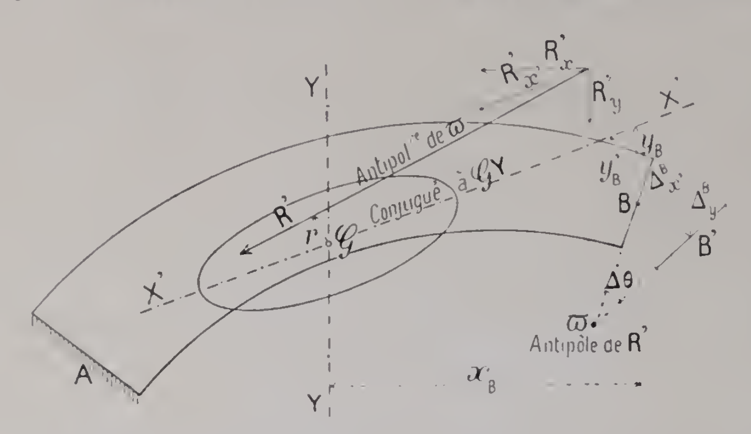
1° Les retombées des voûtes chargées se déplacent horizontalement, comme sous l'effet d'un changement de température ;

2° Les extrémités des voûtes adjacentes aux voûtes chargées sont fixes.

4. — *L'ellisse di elasticità nella scienza delle costruzioni* (Turin 1904).

5. — III. p. 358, D.

§ 3. — *RÉACTION DUE A UN MOUVEMENT NON ÉLASTIQUE DES APPUIS*



Imaginons que les appuis d'un arc AB aient reculé, se soient enfoncés inégalement dans le sol ; supposons fixe l'appui A ; B vient en B', tournant de $\Delta\theta$ autour de ϖ.

Cette rotation crée une réaction R' antipolaire de ϖ par rapport à l'ellipse élastique.

$$\Delta\theta = R' r \sum_A^B \varphi$$ [6]

M. Guidi[7] observe que $\mathcal{G}$ invariablement lié à l'appui B se déplace 1° de Δ_y^B suivant YY, de $\Delta_{x'}^B$, suivant X'X' ; 2° du fait de la rotation $\Delta\theta$, de $x_B\Delta\theta$ et $y'_B\Delta\theta$

Soient R'_y, R'_x les composantes de la réaction R'. On a (p. 130) :

$$R' r \sum_A^B \varphi = -\Delta\theta$$

$$R'_y \times I_{Y^2} \left(\begin{array}{c} \text{moment d'inertie} \\ \text{par rapport à } \mathcal{G}Y \end{array} \right) = x_B \Delta\theta - \Delta_y^B$$

$$R'_x \times I_{X'^2} \left(\begin{array}{c} \text{moment d'inertie} \\ \text{par rapport à } \mathcal{G}X' \end{array} \right) = -\left(y'_B \Delta\theta - \Delta_{x'}^B\right)$$

Le funiculaire **3** donne I_{Y^2}, le funiculaire **4**, $I_{X'}$:

On a R'_y, R'_x puis r.

6. — Ritter « *Anwendungen der graphischen statik* » 4e partie, p. 229. Zurich 1906.

7. — « *Contributo alla teoria degli archi elastici* ». Turin 1908.

3e PARTIE

TABLES

NUMÉRIQUES

FORMULES DE M. BAZIN

Soient, pour un cours d'eau ou un ouvrage d'art,

S la section mouillée en mètres carrés ; P le périmètre mouillé en mètres ;

R le rayon moyen en mètres de la section S, c'est-à-dire $\frac{S}{P}$;

i la pente en mètres par mètre aux abords de la section S ;

u la vitesse moyenne en mètres par seconde de l'eau dans la section S, $u = \alpha\sqrt{i}$.

$$\alpha = \frac{\sqrt{R}}{0.0115\left(1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}\right)} = \frac{R}{0.0115\,(\sqrt{R} + \gamma)} = \frac{86.9565\ R}{\sqrt{R} + \gamma}$$

Pour les ouvrages :
- $\gamma_1 = 0.06$ — ciment, bois raboté.
- $\gamma_2 = 0.16$ — plancher, briques, pierre de taille.
- $\gamma_3 = 0.46$ — mœllons.

Pour les cours d'eau :
- $\gamma_4 = 0.85$ — talus bien dressés ou perreyés.
- $\gamma_5 = 1.30$ — talus ordinaires.
- $\gamma_6 = 1.75$ — talus très rugueux.

Q le débit en mètres cubes qui traverse par seconde la section S, $Q = S\,u$.

Coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$

R	Ouvrages d'art			Cours d'eau			R	Ouvrages d'art			Cours d'eau		
Rayon moyen	$\gamma_1=0.06$ α_1	$\gamma_2=0.16$ α_2	$\gamma_3=0.46$ α_3	$\gamma_4=0.85$ α_4	$\gamma_5=1.30$ α_5	$\gamma_6=1.75$ α_6	Rayon moyen	$\gamma_1=0.06$ α_1	$\gamma_2=0.16$ α_2	$\gamma_3=0.46$ α_3	$\gamma_4=0.85$ α_4	$\gamma_5=1.30$ α_5	$\gamma_6=1.75$ α_6
0m05	15.330	11.333	6.360	4.050	2.853	2.203	0m80	72.886	65.974	51.361	39.878	31.700	26.306
0.06	17.101	12.884	7.401	4.764	3.377	2.615	0.90	77.587	70.589	55.556	43.510	34.803	28.999
0.07	18.753	14.336	8.400	5.461	3.891	3.021	1.00	82.034	74.962	59.559	47.003	37.807	31.620
0.08	20.290	15.708	9.364	6.140	4.394	3.422	1.10	86.265	79.129	63.395	50.374	40.723	34.177
0.09	21.739	17.013	10.297	6.805	4.891	3.817	1.20	90.309	83.115	67.085	53.636	43.560	36.671
0.10	23.112	18.259	11.202	7.456	5.380	4.208	1.30	94.188	86.944	70.644	56.800	46.325	39.112
0.11	24.422	19.455	12.082	8.094	5.862	4.595	1.40	97.922	90.632	74.085	59.874	49.024	41.503
0.12	25.675	20.605	12.939	8.723	6.338	4.977	1.50	101.526	94.194	77.421	62.867	51.662	43.847
0.13	26.879	21.715	13.776	9.338	6.808	5.356	1.60	105.011	97.641	80.659	65.785	54.243	46.147
0.14	28.039	22.790	14.594	9.945	7.271	5.731	1.80	111.670	104.233	86.877	71.417	59.251	50.627
0.15	29.160	23.832	15.393	10.541	7.730	6.102	2.00	117.970	110.476	92.792	76.810	64.075	54.962
0.16	30.245	24.844	16.177	11.130	8.184	6.471	2.25	125.418	117.862	99.822	83.256	69.875	60.201
0.18	32.321	26.789	17.700	12.283	9.077	7.198	2.50	132.463	124.855	106.504	89.419	75.453	65.260
0.20	34.288	28.641	19.170	13.406	9.953	7.915	2.75	139.166	131.512	112.887	95.335	80.833	70.161
0.22	36.160	30.412	20.591	14.503	10.814	8.621	3.00	145.507	137.881	119.007	101.032	86.037	74.918
0.24	37.952	32.112	21.970	15.575	11.659	9.317	3.50	157.625	149.863	130.570	111.858	95.983	84.054
0.26	39.671	33.749	23.310	16.625	12.492	10.004	4.00	168.847	161.030	141.392	122.044	105.401	92.753
0.28	41.327	35.330	24.615	17.654	13.311	10.683	4.50	179.384	171.525	151.590	131.693	114.372	101.077
0.30	42.926	36.860	25.887	18.664	14.118	11.353	5.00	189.359	181.456	161.265	140.885	122.956	109.075
0.32	44.473	38.344	27.129	19.655	14.915	12.016	5.50	198.843	190.906	170.490	149.679	131.202	116.782
0.34	45.972	39.786	28.343	20.630	15.700	12.672	6.00	207.906	199.939	179.323	158.127	139.149	124.238
0.36	47.431	41.190	29.532	21.589	16.476	13.321	6.50	216.598	208.604	187.810	166.264	146.828	131.460
0.38	48.849	42.557	30.697	22.533	17.242	13.963	7.00	224.963	216.945	195.989	174.124	154.266	138.473
0.40	50.230	43.892	31.838	23.462	17.999	14.599	7.50	233.034	224.995	203.892	181.734	161.484	145.295
0.45	53.543	47.098	34.603	25.729	19.854	16.164	8.00	240.840	232.781	211.545	189.116	168.502	151.941
0.50	56.678	50.141	37.252	27.922	21.662	17.694	8.50	248.407	240.330	218.969	196.291	175.337	158.425
0.55	59.661	53.044	39.801	30.048	23.425	19.192	9.00	255.754	247.660	226.187	203.274	182.001	164.759
0.60	62.513	55.825	42.260	32.115	25.149	20.666	9.50	262.896	254.791	233.212	210.082	188.509	170.954
0.70	67.884	61.063	46.943	36.089	28.488	23.532	10.00	269.860	261.737	240.060	216.725	194.870	177.018

EXEMPLES :	Ouverture	Pente i	Hauteur d'eau	$\sqrt{i}$	R	$\frac{u}{\sqrt{i}} =$	u	Q
Buse	0m60	0m005	0m30	0.071	0m15	$\alpha_1 = 29.2$	2m073	0mc293
Aqueduc .	1m	0m05 (*Radier*)	0m50	0.224	0m25	$\alpha_3 = \frac{21.97 + 23.31}{2} = 22.64$	5m071	2mc54

ÉPAISSEUR A LA CLEF

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE DE PORTÉE 2a

$$e_0 = \alpha\,(1 + \sqrt{2a})$$ (Tome III, p. 343)

Valeurs de e_0 pour 2a variant de 0m60 à 100m et α de 0.10 à 0.25

(1). — *Bonnes moyennes.* — Ponts : sous route, 0.15 ; sous voie étroite, 0.17 ; sous voie normale, 0.19.

Ponts (1) sous route — Ponts sous (1) voie étroite — Ponts sous voie (1) normale

Valeurs de e_0 pour α =

Portée 2a	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
0m60	0m18	0m20	0m21	0m23	0m25	0m27	0m28	0m30	0m32	0m34	0m36	0m37	0m39	0m41	0m43	0m44
0.70	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.39	0.40	0.42	0.44	0.46
1	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
1.50	0.22	0.24	0.27	0.29	0.31	0.33	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.47	0.49	0.51	0.53	0.56
2	0.24	0.27	0.29	0.31	0.34	0.36	0.39	0.41	0.43	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	0.60
2.50	0.26	0.28	0.31	0.34	0.36	0.39	0.41	0.44	0.46	0.49	0.52	0.54	0.57	0.59	0.62	0.65
3	0.27	0.30	0.33	0.36	0.38	0.41	0.44	0.46	0.49	0.52	0.55	0.57	0.60	0.63	0.66	0.68
4	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75
5	0.32	0.36	0.39	0.42	0.45	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.65	0.68	0.71	9.74	0.78	0.81
6	0.34	0.38	0.41	0.45	0.48	0.52	0.55	0.59	0.62	0.66	0.69	0.72	0.76	0.79	0.83	0.86
7	0.36	0.40	0.44	0.47	0.51	0.55	0.58	0.62	0.66	0.69	0.73	0.77	0.80	0.84	0.87	0.91
8	0.38	0.42	0.46	0.50	0.54	0.57	0.61	0.65	0.69	0.73	0.77	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96
9	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96	1.00
10m	0.42	0.46	0.50	0.54	0.58	0.62	0.67	0.71	0.75	0.79	0.83	0.87	0.92	0.96	1.00	1.04
11	0.43	0.47	0.52	0.56	0.60	0.65	0.69	0.73	0.78	0.82	0.86	0.91	0.95	0.99	1.04	1.08
12	0.45	0.49	0.54	0.58	0.62	0.67	0.71	0.76	0.80	0.85	0.89	0.94	0.98	1.03	1.07	1.12
13	0.46	0.51	0.55	0.60	0.64	0.69	0.74	0.78	0.83	0.88	0.92	0.97	1.01	1.06	1.11	1.15
14	0.47	0.52	0.57	0.62	0.66	0.71	0.76	0.81	0.85	0.90	0.95	1.00	1.04	1.09	1.14	1.19
15	0.49	0.54	0.58	0.63	0.68	0.73	0.78	0.83	0.88	0.93	0.97	1.02	1.07	1.12	1.17	1.22
16	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
17	0.51	0.56	0.61	0.67	0.72	0.77	0.82	0.87	0.92	0.97	1.02	1.08	1.13	1.18	1.23	1.28
18	0.52	0.58	0.63	0.68	0.73	0.79	0.84	0.89	0.94	1.00	1.05	1.10	1.15	1.21	1.26	1.31
19	0.54	0.59	0.64	0.70	0.75	0.80	0.86	0.91	0.96	1.02	1.07	1.13	1.18	1.23	1.29	1.34
20	0.55	0.60	0.66	0.71	0.77	0.82	0.88	0.93	0.98	1.04	1.09	1.15	1.20	1.26	1.31	1.37

Ponts (1) sous route — Ponts sous (1) voie étroite — Ponts sous voie (1) normale

Valeurs de e_0 pour α =

Portée 2a	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
21m	0m56	0m61	0m67	0m73	0m78	0m84	0m89	0m95	1m00	1m06	1m12	1m17	1m23	1m28	1m34	1m40
22	0.57	0.63	0.68	0.74	0.80	0.85	0.91	0.97	1.02	1.08	1.14	1.19	1.25	1.31	1.37	1.42
23	0.58	0.64	0.70	0.75	0.81	0.87	0.93	0.99	1.04	1.10	1.16	1.22	1.28	1.33	1.39	1.45
24	0.59	0.65	0.71	0.77	0.83	0.88	0.94	1.00	1.06	1.12	1.18	1.24	1.30	1.36	1.42	1.47
25	0.60	0.66	0.72	0.78	0.84	0.90	0.96	1.02	1.08	1.14	1.20	1.26	1.32	1.48	1.44	1.50
26	0.61	0.67	0.73	0.79	0.85	0.91	0.98	1.04	1.10	1.16	1.22	1.28	1.34	1.40	1.46	1.52
27	0.62	0.68	0.74	0.81	0.87	0.93	0.99	1.05	1.12	1.18	1.24	1.30	1.36	1.43	1.49	1.55
28	0.63	0.69	0.75	0.82	0.88	0.94	1.01	1.07	1.13	1.20	1.26	1.32	1.38	1.45	1.51	1.57
29	0.64	0.70	0.77	0.83	0.89	0.96	1.02	1.09	1.15	1.21	1.28	1.34	1.40	1.47	1.53	1.60
30	0.65	0.71	0.78	0.84	0.91	0.97	1.04	1.10	1.17	1.23	1.30	1.36	1.42	1.49	1.55	1.62
31	0.66	0.72	0.79	0.85	0.92	0.99	1.05	1.12	1.18	1.25	1.31	1.38	1.44	1.51	1.58	1.64
32	0.67	0.73	0.80	0.87	0.93	1.00	1.07	1.13	1.20	1.26	1.33	1.40	1.46	1.53	1.60	1.66
33	0.67	0.74	0.81	0.88	0.94	1.01	1.08	1.15	1.21	1.28	1.35	1.42	1.48	1.55	1.62	1.69
34	0.68	0.75	0.82	0.89	0.96	1.02	1.09	1.16	1.23	1.30	1.37	1.43	1.50	1.57	1.64	1.71
35	0.69	0.76	0.83	0.90	0.97	1.04	1.11	1.18	1.24	1.31	1.38	1.45	1.52	1.59	1.66	1.73
36	0.70	0.77	0.84	0.91	0.98	1.05	1.12	1.19	1.26	1.33	1.40	1.47	1.54	1.61	1.68	1.75
37	0.71	0.78	0.85	0.92	0.99	1.06	1.13	1.20	1.27	1.35	1.42	1.49	1.56	1.63	1.70	1.77
38	0.72	0.79	0.86	0.93	1.00	1.07	1.15	1.22	1.29	1.36	1.43	1.50	1.58	1.65	1.72	1.79
39	0.72	0.80	0.87	0.94	1.01	1.09	1.16	1.23	1.30	1.38	1.45	1.52	1.59	1.67	1.74	1.81
40	0.73	0.81	0.88	0.95	1.03	1.10	1.17	1.25	1.32	1.39	1.46	1.54	1.61	1.68	1.76	1.83
41	0.74	0.81	0.89	0.96	1.04	1.11	1.18	1.26	1.33	1.41	1.48	1.55	1.63	1.70	1.78	1.85
42	0.75	0.82	0.90	0.97	1.05	1.12	1.20	1.27	1.35	1.42	1.50	1.57	1.65	1.72	1.80	1.87
43	0.76	0.83	0.91	0.98	1.06	1.13	1.21	1.28	1.36	1.44	1.51	1.59	1.66	1.74	1.81	1.89
44	0.76	0.84	0.92	0.99	1.07	1.14	1.22	1.30	1.37	1.45	1.53	1.60	1.68	1.76	1.83	1.91

Valeurs de e_0 pour : Ponts (1) sous route ; Ponts sous (1) voie étroite ; Ponts sous voie (1) normale ; $\alpha =$

Portée 2a	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
45^m	0^{m}77	0^{m}85	0^{m}92	1^{m}00	1^{m}08	1^{m}16	1^{m}23	1^{m}31	1^{m}39	1^{m}46	1^{m}54	1^{m}62	1^{m}70	1^{m}77	1^{m}85	1^{m}93
46	0.78	0.86	0.93	1.01	1.09	1.17	1.25	1.32	1.40	1.48	1.56	1.63	1.71	1.79	1.87	1.95
47	0.79	0.86	0.94	1.02	1.10	1.18	1.26	1.34	1.41	1.49	1.57	1.65	1.73	1.81	1.89	1.96
48	0.79	0.87	0.95	1.03	1.11	1.19	1.27	1.35	1.43	1.51	1.59	1.66	1.74	1.82	1.90	1.98
49	0.80	0.88	0.96	1.04	1.12	1.20	1.28	1.36	1.44	1.52	1.60	1.68	1.76	1.84	1.92	2.00
50	0.81	0.89	0.97	1.05	1.13	1.21	1.29	1.37	1.45	1.53	1.61	1.69	1.78	1.86	1.94	2.02
51	0.81	0.90	0.98	1.06	1.14	1.22	1.30	1.38	1.47	1.55	1.63	1.71	1.79	1.87	1.95	2.04
52	0.82	0.90	0.99	1.07	1.15	1.23	1.31	1.40	1.48	1.56	1.64	1.72	1.81	1.89	1.97	2.05
53	0.83	0.91	0.99	1.08	1.16	1.24	1.32	1.41	1.49	1.57	1.66	1.74	1.82	1.90	1.99	2.07
54	0.83	0.92	1.00	1.09	1.17	1.25	1.34	1.42	1.50	1.59	1.67	1.75	1.83	1.92	2.00	2.09
55	0.84	0.93	1.01	1.09	1.18	1.26	1.35	1.43	1.51	1.60	1.68	1.77	1.85	1.94	2.02	2.10
56	0.85	0.93	1.02	1.10	1.19	1.27	1.36	1.44	1.53	1.61	1.70	1.78	1.87	1.95	2.04	2.12
57	0.85	0.94	1.03	1.11	1.20	1.28	1.37	1.45	1.54	1.62	1.71	1.80	1.88	1.97	2.05	2.14
58	0.86	0.95	1.03	1.12	1.21	1.29	1.38	1.46	1.55	1.64	1.72	1.81	1.90	1.98	2.07	2.15
59	0.87	0.95	1.04	1.13	1.22	1.30	1.39	1.48	1.56	1.65	1.74	1.82	1.91	2.00	2.08	2.17
60	0.87	0.96	1.05	1.14	1.22	1.31	1.40	1.49	1.57	1.66	1.75	1.84	1.92	2.01	2.10	2.19
61	0.88	0.97	1.06	1.15	1.23	1.32	1.41	1.50	1.59	1.67	1.76	1.85	1.94	2.03	2.11	2.20
62	0.89	0.98	1.06	1.15	1.24	1.33	1.42	1.51	1.60	1.69	1.77	1.86	1.95	2.04	2.13	2.22
63	0.89	0.98	1.07	1.16	1.25	1.34	1.43	1.52	1.61	1.70	1.79	1.88	1.97	2.06	2.14	2.23
64	0.90	0.99	1.08	1.17	1.26	1.35	1.44	1.53	1.62	1.71	1.80	1.89	1.98	2.07	2.16	2.25
65	0.91	1.00	1.09	1.18	1.27	1.36	1.45	1.54	1.63	1.72	1.81	1.90	1.99	2.08	2.17	2.27
66	0.91	1.00	1.09	1.19	1.28	1.37	1.46	1.55	1.64	1.73	1.82	1.92	2.01	2.10	2.19	2.28
67	0.92	1.01	1.10	1.19	1.29	1.38	1.47	1.56	1.65	1.75	1.84	1.93	2.02	2.11	2.20	2.30
68	0.92	1.02	1.11	1.20	1.29	1.39	1.48	1.57	1.66	1.76	1.85	1.94	2.03	2.13	2.22	2.31
69	0.93	1.02	1.12	1.21	1.30	1.40	1.49	1.58	1.68	1.77	1.86	1.95	2.05	2.14	2.23	2.33
70	0.94	1.03	1.12	1.22	1.31	1.40	1.50	1.59	1.69	1.78	1.87	1.97	2.06	2.15	2.25	2.34
71	0.94	1.04	1.13	1.23	1.32	1.41	1.51	1.60	1.70	1.79	1.89	1.98	2.07	2.17	2.26	2.36
72	0.95	1.04	1.14	1.23	1.33	1.42	1.52	1.61	1.71	1.80	1.90	1.99	2.09	2.18	2.28	2.37

Valeurs de e_0 pour : Ponts (1) sous route ; Ponts sous (1) voie étroite ; Ponts sous voie (1) normale ; $\alpha =$

Portée 2a	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
73^m	0^{m}95	1^{m}05	1^{m}14	1^{m}24	1^{m}34	1^{m}43	1^{m}53	1^{m}62	1^{m}72	1^{m}81	1^{m}91	2^{m}00	2^{m}10	2^{m}20	2^{m}29	2^{m}39
74	0.96	1.06	1.15	1.25	1.34	1.44	1.54	1.63	1.73	1.82	1.92	2.02	2.11	2.21	2.30	2.40
75	0.97	1.06	1.16	1.26	1.35	1.45	1.55	1.64	1.74	1.84	1.93	2.03	2.13	2.22	2.32	2.42
76	0.97	1.07	1.17	1.26	1.36	1.46	1.55	1.65	1.75	1.85	1.94	2.04	2.14	2.24	2.33	2.43
77	0.98	1.08	1.17	1.27	1.37	1.47	1.56	1.66	1.76	1.86	1.96	2.05	2.15	2.25	2.35	2.44
78	0.98	1.08	1.18	1.28	1.38	1.47	1.57	1.67	1.77	1.87	1.97	2.06	2.16	2.26	2.36	2.46
79	0.99	1.09	1.19	1.29	1.38	1.48	1.58	1.68	1.78	1.88	1.98	2.08	2.18	2.27	2.37	2.47
80	0.99	1.09	1.19	1.29	1.39	1.49	1.59	1.69	1.79	1.89	1.99	2.09	2.19	2.29	2.39	2.49
81	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50
82	1.00	1.11	1.21	1.31	1.41	1.51	1.61	1.71	1.81	1.91	2.01	2.11	2.21	2.31	2.41	2.51
83	1.01	1.11	1.21	1.31	1.42	1.52	1.62	1.72	1.82	1.92	2.02	2.12	2.22	2.33	2.43	2.53
84	1.02	1.12	1.22	1.32	1.42	1.52	1.63	1.73	1.83	1.93	2.03	2.13	2.24	2.34	2.44	2.54
85	1.02	1.12	1.23	1.33	1.43	1.53	1.64	1.74	1.84	1.94	2.04	2.15	2.25	2.35	2.45	2.55
86	1.03	1.13	1.23	1.34	1.44	1.54	1.64	1.75	1.85	1.95	2.05	2.16	2.26	2.36	2.47	2.57
87	1.03	1.14	1.24	1.34	1.45	1.55	1.65	1.76	1.86	1.96	2.07	2.17	2.27	2.38	2.48	2.58
88	1.04	1.14	1.25	1.35	1.45	1.56	1.66	1.76	1.87	1.97	2.08	2.18	2.28	2.39	2.49	2.60
89	1.04	1.15	1.25	1.36	1.46	1.57	1.67	1.77	1.88	1.98	2.09	2.19	2.30	2.40	2.50	2.61
90	1.05	1.15	1.26	1.36	1.47	1.57	1.68	1.78	1.89	1.99	2.10	2.20	2.31	2.41	2.52	2.62
91	1.05	1.16	1.26	1.37	1.48	1.58	1.69	1.79	1.90	2.00	2.11	2.21	2.32	2.42	2.53	2.63
92	1.06	1.17	1.27	1.38	1.48	1.59	1.69	1.80	1.91	2.01	2.12	2.22	2.33	2.44	2.54	2.65
93	1.06	1.17	1.28	1.38	1.49	1.60	1.70	1.81	1.92	2.02	2.13	2.24	2.34	2.45	2.55	2.66
94	1.07	1.18	1.28	1.39	1.50	1.60	1.71	1.82	1.93	2.03	2.14	2.25	2.35	2.46	2.57	2.67
95	1.07	1.18	1.29	1.40	1.50	1.61	1.72	1.83	1.93	2.04	2.15	2.26	2.36	2.47	2.58	2.69
96	1.08	1.19	1.30	1.40	1.51	1.62	1.73	1.84	1.94	2.05	2.16	2.27	2.38	2.48	2.59	2.70
97	1.08	1.19	1.30	1.41	1.52	1.63	1.74	1.84	1.95	2.06	2.17	2.28	2.39	2.50	2.60	2.71
98	1.09	1.20	1.31	1.42	1.53	1.63	1.74	1.85	1.96	2.07	2.18	2.29	2.40	2.51	2.62	2.72
99	1.09	1.20	1.31	1.42	1.53	1.64	1.75	1.86	1.97	2.08	2.19	2.30	2.41	2.52	2.63	2.74
100	1.10	1.21	1.32	1.43	1.54	1.65	1.76	1.87	1.98	2.09	2.20	2.31	2.42	2.53	2.64	2.75

ÉPAISSEUR A LA CLEF

VOÛTES SURBAISSÉES EN ELLIPSE, EN ARC

Portée $2a$ Surbaissement σ

$$e'_0 = \alpha\,(1 + \sqrt{2a})\,\mu = e_0 \left(\begin{array}{c}\text{Epaisseur à la clef}\\ \text{d'une voûte en plein cintre}\\ \text{de portée } 2a \text{ Table } T_2\end{array}\right) \times \mu$$

1

Valeurs de μ

σ	μ Ellipse	μ Arc	σ	μ Ellipse	μ Arc	σ	μ Ellipse	μ Arc
$0.50 = \frac{1}{2}$	1	1	0.31	1.1049	1.0481	$0.1428 = \frac{1}{7}$	1.2170	1.1701
0.49	1.0050	1.0001	0.30	1.1111	1.0533	0.14	1.2195	1.1728
0.48	1.0101	1.0005	0.29	1.1173	1.0588	$0.1333 = \frac{1}{7,5}$	1.2244	1.1791
0.47	1.0152	1.0012	$0.2887 = \frac{1}{2\sqrt{3}}$	1.1181	1.0593	0.13	1.2269	1.1825
0.46	1.0204	1.0021				$0.125 = \frac{1}{8}$	1.2307	1.1874
0.45	1.0256	1.0033	0.28	1.1235	1.0645	0.12	»	1.1925
0.44	1.0309	1.0046	0.27	1.1299	1.0703	$0.1111 = \frac{1}{9}$	»	1.2014
0.43	1.0362	1.0065	0.26	1.1363	1.0768	0.11	»	1.2028
0.42	1.0416	1.0085	$0.25 = \frac{1}{4}$	1.1428	1.0833	$0.10 = \frac{1}{10}$	»	1.2133
0.41	1.0471	1.0108	0.24	1.1494	1.0901		»	1.2229
$0.40 = \frac{1}{2.5}$	1.0526	1.0133	0.23	1.1560	1.0972	$0.091 = \frac{1}{11}$	»	1.2241
0.39	1.0582	1.0161	0.22	1.1627	1.1045	0.09	»	1.2314
0.38	1.0638	1.0192	0.21	1.1695	1.1121	$0.0833 = \frac{1}{12}$		
0.37	1.0695	1.0225	$0.20 = \frac{1}{5}$	1 1764	1.1200			
0.36	1.0748	1.0261	0.19	1.1834	1.1281			
0.35	1.0810	1.0300	0.18	1.1904	1.1365			
0.34	1.0869	1.0348	0.17	1.1976	1.1452			
$0.3333 = \frac{1}{3}$	1.0909	1.0372	$0.1666 = \frac{1}{6}$	1.2000	1.1460			
0.33	1.0928	1.0385	0.16	1.2048	1.1543			
0.32	1.0989	1.0432	0.15	1.2121	1.1633			

Arcs peu surbaissés — Arcs assez surbaissés — Arcs très surbaissés

$$1. - \mu \left(\begin{array}{c}\text{Tome III}\\ \text{p. 313}\end{array}\right) = \begin{cases} \text{Ellipses } \dfrac{4}{3 + 2\sigma} \\ \text{Arcs } \dfrac{4}{3}(1 - \sigma + \sigma^2) \end{cases}$$

TABLE T_4

FRUIT MINIMUM φ A DONNER AU TYMPAN CONVEXE

DES PONTS OU VIADUCS EN COURBE DE RAYON R

POUR QU'AUCUN POINT DE L'INTRADOS DU BANDEAU NE SOIT EN PORTE-A-FAUX PAR RAPPORT A UN POINT PLUS BAS : MIN $\varphi = \frac{r}{R}$ (p. 89).

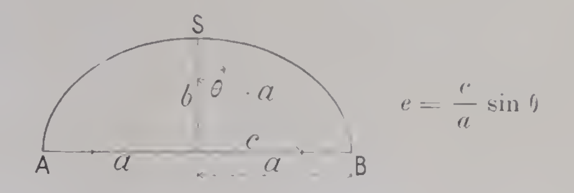
r est : pour un plein cintre et un arc de cercle, le *rayon de l'intrados* — ($2r$ est la *portée d'un plein cintre*) ; pour une ellipse, le *rayon de courbure au sommet*.

$2r$	Valeurs de φ pour R = 150m	200m	250m	300m	350m	400m	500m	600m	700m	800m	$2r$	Valeurs de φ pour R = 150m	200m	250m	300m	350m	400m	500m	600m	700m	800m
	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m		m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m
4m	13.3	10.0	8.0	6.7	5.7	5.0	4.0	3.3	2.9	2.5	32m	106.7	80.0	64.0	53.3	45.7	40.0	32.0	26.7	22.9	20.0
5	16.7	12.5	10.0	8.3	7.1	6.3	5.0	4.2	3.6	3.1	33	110.0	82.5	66.0	55.0	47.1	41.3	33.0	27.5	23.6	20.6
6	20.0	15.0	12.0	10.0	8.6	7.5	6.0	5.0	4.3	3.8	34	113.3	85.0	68.0	56.7	48.6	42.5	34.0	28.3	24.3	21.3
7	23.3	17.5	14.0	11.7	10.0	8.8	7.0	5.8	5.0	4.4	35	116.7	87.5	70.0	58.3	50.0	43.8	35.0	29.2	25.0	21.9
8	26.7	20.0	16.0	13.3	11.4	10.0	8.0	6.7	5.7	5.0	36	120.0	90.0	72.0	60.0	51.4	45.0	36.0	30.0	25.7	22.5
9	30.0	22.5	18.0	15.0	12.8	11.3	9.0	7.5	6.4	5.6	37	123.3	92.5	74.0	61.7	52.8	46.3	37.0	30.8	26.4	23.1
10	33.3	25.0	20.0	16.7	14.2	12.5	10.0	8.3	7.1	6.3	38	126.7	95.0	76.0	63.3	54.2	47.5	38.0	31.7	27.1	23.8
11	36.7	27.5	22.0	18.3	15.7	13.8	11.0	9.2	7.9	6.9	39	130.0	97.5	78.0	65.0	55.7	48.8	39.0	32.5	27.9	24.4
12	40 0	30.0	24.0	20.0	17.1	15.0	12.0	10.0	8.6	7.5	40	133.3	100.0	80.0	66.7	57.1	50.0	40.0	33.3	28.6	25.0
13	43.3	32.5	26.0	21.7	18.6	16.3	13.0	10.8	9.3	8.1	41	136.7	102.5	82.0	68.3	58.6	51.3	41.0	34.2	29.3	25.6
14	46.7	35.0	28.0	23.3	20.0	17.5	14.0	11.7	10.0	8.8	42	140.0	105.0	84.0	70.0	60.0	52.5	42.0	35.0	30.0	26.3
15	50.0	37.5	30.0	25.0	21.4	18.8	15.0	12.5	10.7	9.4	43	143.3	107.5	86.0	71.7	61.4	53.8	43.0	35.8	30.7	26.9
16	53.3	40.0	32.0	26.7	22.8	20.0	16.0	13.3	11.4	10.0	44	146.7	110.0	88.0	73.3	62.8	55.0	44.0	36.7	31.4	27.5
17	56.7	42.5	34.0	28.3	24.2	21.3	17.0	14.2	12.1	10.6	45	150.0	112.5	90.0	75.0	64.2	56.3	45.0	37.5	32.1	28.1
18	60.0	45.0	36.0	30.0	25.7	22.5	18.0	15.0	12.9	11.3	46	153.3	115.0	92.0	76.7	65.7	57.5	46.0	38.3	32.9	28.8
19	63.3	47.5	38.0	31.7	27.1	23.8	19.0	15.8	13.6	11.9	47	156.7	117.5	94.0	78.3	67.1	58.8	47.0	39.2	33.6	29.4
20	66.7	50.0	40.0	33.3	28.6	25.0	20.0	16.7	14.3	12.5	48	160.0	120.0	96.0	80.0	68.6	60.0	48.0	40.0	34.3	30.0
21	70.0	52.5	42.0	35.0	30.0	26.3	21.0	17.5	15.0	13.1	49	163.3	122.5	98.0	81.7	70.0	61.3	49.0	40.8	35.0	30.6
22	73.3	55.0	44.0	36.7	31.4	27.5	22.0	18.3	15.7	13.8	50	166.7	125.0	100.0	83.3	71.4	62.5	50.0	41.7	35.7	31.3
23	76.7	57.5	46.0	38.3	32.8	28.8	23.0	19.2	16.4	14.4	51	170.0	127.5	102.0	85.0	72.8	63.8	51.0	42.5	36.4	31.9
24	80.0	60.0	48 0	40.0	34.2	30.0	24.0	20.0	17.1	15.0	52	173.3	130.0	104.0	86.7	74.2	65.0	52.0	43.3	37.1	32.5
25	83.3	62.5	50.0	41.7	35.7	31.3	25.0	20.8	17.9	15.6	53	176.7	132.5	106.0	88.3	75.7	66.3	53.0	44.2	37.9	33.1
26	86.7	65.0	52.0	43.3	37.1	32.5	26.0	21.7	18.6	16.3	54	180.0	135.0	108.0	90.0	77.1	67.5	54.0	45.0	38.6	33.8
27	90 0	67.5	54.0	45.0	38.6	33.8	27.0	22.5	19.3	16.9	55	183.3	137.5	110.0	91.7	78.6	68.8	55.0	45.8	39.3	34.4
28	93.3	70.0	56.0	46.7	40.0	35.0	28.0	23.3	20.0	17.5	56	186.7	140.0	112.0	93.3	80.0	70.0	56.0	46.7	40.0	35.0
29	96.7	72.5	58.0	48.3	41.4	36.3	29.0	24.2	20.7	18.1	57	190.0	142.5	114.0	95.0	81.4	71.3	57.0	47.5	40.7	35.6
30	100.0	75.0	60.0	50.0	42.8	37.5	30.0	25.0	21.4	18.8	58	193.3	145.0	116.0	96.7	82.8	72.5	58.0	48.3	41.4	36.3
31	103.3	77.5	62.0	51.7	44.2	38.8	31.0	25.8	22.1	19.4	60	200.0	150.0	120.0	100.0	85.7	75.0	60.0	50.0	42.9	37.5

TABLE T_5 — DÉVELOPPEMENT ASB = L [1]

D'UNE ELLIPSE DE SURBAISSEMENT $\sigma = \frac{b}{2a}$

$\theta =$ Arc sin $\frac{c}{a}$	$\sigma = \frac{1}{2}\cos\theta$	Différences	$\frac{L}{2a}$	Différences
35°	0.409 576		1.432 291	
		5067		7531
36°	0.404 509		1.424 760	
		5191		7685
37°	0.399 318		1.417 075	
		5312		7835
38°	0.394 006		1.409 240	
		5433		7980
39°	0.388 573		1.401 260	
		5551		8120
40°	0.383 022		1.393 140	
		5667		8253
41°	0.377 355		1.384 887	
		5782		8383
42°	0.371 573		1.376 504	
		5896		8505
43°	0.365 677		1.367 999	
		6077		8622
44°	0.359 670		1.359 377	
		6117		8733
45°	0.353 553		1.350 644	
		6224		8838
46°	0.347 329		1.341 806	
		6330		8936
47°	0.340 999		1.332 870	
		6433		9028
48°	0.334 566		1.323 842	
		6536		9112
49°	0.328 030		1.314 730	
		6636		9191
50°	0.321 394		1.305 539	
		6734		9261
51°	0.314 660		1.296 278	
		6829		9324
52°	0.307 831		1.286 954	
		6923		9380
53°	0.300 908		1.277 574	
		7015		9427
54°	0.293 893		1.268 147	
		7105		9467
55°	0.286 788		1.258 680	
		7191		9498
56°	0.279 597		1.249 182	
		7277		9521
57°	0.272 320		1.239 661	
		7360		9534
58°	0.264 960		1.230 127	
		7441		9538
59°	0.257 519		1.220 589	
		7519		9533
60°	0.250 000		1.211 056	
		7595		9518
61°	0.242 405		1.201 538	
		7669		9492
62°	0.234 736		1.192 046	
		7741		9457
63°	0.226 995		1.182 589	
		7809		9410
64°	0.219 186		1.173 179	
		7877		9351
65°	0.211 309		1.163 828	
		7940		9281
66°	0.203 369		1.154 547	
		8003		9199
67°	0.195 366		1.145 348	
		8062		9104
68°	0.187 304		1.136 244	
		8120		8986
69°	0.179 184		1.127 250	
		8174		8872
70°	0.171 010		1.118 378	
		8226		8735
71°	0.162 784		1.109 643	
		8275		8581
72°	0.154 509		1.101 062	
		8323		8412
73°	0.146 186		1.092 650	
		8367		8225
74°	0.137 819		1.084 425	
		8409		8020
75°	0.129 410		1.076 405	
		8449		7795
76°	0.120 961		1.068 610	



$$e = \frac{c}{a}\sin\theta$$

L est aussi donné par la série :

$$L = \pi a \left\{ \begin{array}{l} 1 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 - \frac{1}{3}\left(\frac{1\,.\,3}{2\,.\,4}e^2\right)^2 - \frac{1}{5}\left(\frac{1\,.\,3\,.\,5}{2\,.\,4\,.\,6}e^3\right)^2 - \cdots \\ - \frac{1}{2p-1}\left(\frac{1\,.\,3\,.\,5 \ldots . (2p-1)}{2\,.\,4\,.\,6 \ldots . \quad 2p}e^p\right)^2 - \ldots\ldots \end{array} \right\}$$

Elle est très lentement convergente :

on lui préfèrera la formule de Houël :

$$L = \pi\frac{a+b}{2}\left[\left\{1 + \frac{1}{8}\left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2\right\}^2 + \frac{1}{256}\left(\frac{a-b}{a+b}\right)^6\right]$$

Application :

	Pont de Chalonnes	Pont de Marmande
$2a$	30m	36m
σ	$\frac{1}{4} = 0{,}25$	$\frac{1}{3{,}6} = 0{,}277\ 777$
L (Table T_5).......	36m332	44m885
L (Formule Houël).	36m331	44m884

1. — Extrait des tables de Legendre. « *Traité des fonctions elliptiques et des intégrales eulériennes.... par A. M. Legendre....* Paris — Imprimerie de Huzard-Courcier (1825-1826) 2e volume, page 291.

TABLE T_6. Pression normale p en kilog. sur un mq de douelle de cintre, à une distance α de la clef

$$p = \gamma c \left(1 + \frac{c}{2R}\right) \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}, \text{ ou, pour les grandes voûtes, } \gamma c \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$$

γ, densité de la maçonnerie ; R, rayon de courbure de l'intrados ; c, épaisseur du rouleau à α de la clef

Distances angulaires à la clef α	$\log \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\operatorname{colog} \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\frac{1}{\sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}}$	Distances angulaires à la clef α	$\log \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\operatorname{colog} \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\frac{1}{\sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}}$
0°	0	0	1	1	35°	$\bar{1}.918238$	0.081762	0.828396	1.207152
1	$\bar{1}.999941$	0.000059	0.999864	1.000136	36	$\bar{1}.912755$	0.087245	0.818003	1.222489
2	$\bar{1}.999764$	0.000236	0.999457	1.000544	37	$\bar{1}.907009$	0.092991	0.807252	1.238771
3	$\bar{1}.999470$	0.000530	0.998780	1.001221	38	$\bar{1}.900986$	0.099014	0.796134	1.256071
4	$\bar{1}.999058$	0.000942	0.997834	1.002172	39	$\bar{1}.894671$	0.105329	0.784641	1.274468
5	$\bar{1}.998526$	0.001474	0.996612	1.003400	40	$\bar{1}.888045$	0.111955	0.772761	1.294062
6	$\bar{1}.997876$	0.002124	0.995121	1.004903	41	$\bar{1}.881088$	0.118912	0.760481	1.314958
7	$\bar{1}.997106$	0.002894	0.993359	1.006686	42	$\bar{1}.873781$	0.126219	0.747792	1.337270
8	$\bar{1}.996215$	0.003785	0.991323	1.008753	43	$\bar{1}.866096$	0.133904	0.734676	1.361144
9	$\bar{1}.995202$	0.004798	0.989013	1.011109	44	$\bar{1}.858008$	0.141992	0.721121	1.386730
10	$\bar{1}.994066$	0.005934	0.986429	1.013758	45	$\bar{1}.849485$	0.150515	0.707107	1.414214
11	$\bar{1}.992806$	0.007194	0.983571	1.016702	46	$\bar{1}.840491$	0.159509	0.692614	1.443807
12	$\bar{1}.991421$	0.008579	0.980440	1.019950	47	$\bar{1}.830985$	0.169015	0.677619	1.475757
13	$\bar{1}.989908$	0.010092	0.977030	1.023510	48	$\bar{1}.820921$	0.179079	0.662096	1.510355
14	$\bar{1}.988266$	0.011734	0.973343	1.027387	49	$\bar{1}.810244$	0.189756	0.646017	1.547947
15	$\bar{1}.986493$	0.013507	0.969378	1.031590	50	$\bar{1}.798891$	0.201109	0.629348	1.588952
16	$\bar{1}.984586$	0.015414	0.965131	1.036129	51	$\bar{1}.786787$	0.213213	0.612051	1.633854
17	$\bar{1}.982545$	0.017455	0.960605	1.041010	52	$\bar{1}.773844$	0.226156	0.594079	1.683278
18	$\bar{1}.980365$	0.019635	0.955795	1.046249	53	$\bar{1}.759955$	0.240045	0.575380	1.737980
19	$\bar{1}.978044$	0.021956	0.950701	1.051856	54	$\bar{1}.744991$	0.255009	0.555892	1.798908
20	$\bar{1}.975579$	0.024421	0.945319	1.057842	55	$\bar{1}.728792$	0.271208	0.535540	1.867274
21	$\bar{1}.972967$	0.027033	0.939652	1.064226	56	$\bar{1}.711159$	0.288841	0.514232	1.944648
22	$\bar{1}.970204$	0.029796	0.933693	1.071017	57	$\bar{1}.691837$	0.308163	0.491855	2.033121
23	$\bar{1}.967287$	0.032713	0.927442	1.078236	58	$\bar{1}.670498$	0.329502	0.468272	2.135512
24	$\bar{1}.964210$	0.035790	0.920895	1.085900	59	$\bar{1}.646699$	0.353301	0.443301	2.255802
25	$\bar{1}.960970$	0.039030	0.914030	1.094033	60	$\bar{1}.619835$	0.380165	0.416711	2.399753
26	$\bar{1}.957561$	0.042439	0.906904	1.102654	61	$\bar{1}.589036$	0.410964	0.388182	2.576107
27	$\bar{1}.953979$	0.046021	0.899454	1.111785	62	$\bar{1}.552996$	0.447004	0.357270	2.799007
28	$\bar{1}.950216$	0.049784	0.891694	1.121461	63	$\bar{1}.509617$	0.490383	0.323308	3.093028
29	$\bar{1}.946268$	0.053732	0.883625	1.131702	64	$\bar{1}.455202$	0.544798	0.285234	3.505887
30	$\bar{1}.942127$	0.057873	0.875240	1.142545	65	$\bar{1}.382255$	0.617745	0.241132	4.147105
31	$\bar{1}.937785$	0.062215	0.866533	1.154025	66	$\bar{1}.271409$	0.728591	0.186814	5.352923
32	$\bar{1}.933235$	0.066765	0.857502	1.166178	67	$\bar{1}.032888$	0.967112	0.107867	9.270681
33	$\bar{1}.928467$	0.071533	0.848139	1.179052	67°30	$-\infty$	$+\infty$	0	$+\infty$
34	$\bar{1}.923472$	0.076528	0.838440	1.192691					

TABLE T_7. — Compression moyenne β_m en kilog. à admettre par $\overline{0^m01}^2$ de section transversale d'une pièce de bois comprimée, pour un élancement $\varphi = \dfrac{\text{L (Longueur libre)}}{b \text{ (plus petit côté ou diamètre)}}$:

Pièces carrées ou rectangulaires $\beta_m = \dfrac{80}{1 + \left(\dfrac{\varphi}{24}\right)^2}$ Pieux ronds $\beta_m = \dfrac{60}{1 + \dfrac{1}{3}\left(\dfrac{\varphi}{12}\right)^2}$

φ	β_m		φ	β_m		φ	β_m		φ	β_m	
	Pièces carrées ou rectangulaires	Pieux ronds		Pièces carrées ou rectangulaires	Pieux ronds		Pièces carrées ou rectangulaires	Pieux ronds		Pièces carrées ou rectangulaires	Pieux ronds
0	80^k00	60^k00	13	61^k85	43^k13	26	36^k80	23^k39	39	21^k97	13^k27
1	79 86	59 86	14	59 69	41 27	27	35 31	22 33	40	21 18	12 76
2	79 45	59 45	15	57 53	39 45	28	33 88	21 32	41	20 42	12 27
3	78 77	58 78	16	55 38	37 67	29	32 52	20 36	42	19 69	11 80
4	77 84	57 86	17	53 27	35 95	30	31 22	19 46	43	19 00	11 36
5	76 67	56 72	18	51 20	34 29	31	29 98	18 61	44	18 34	10 95
6	75 29	55 38	19	49 18	32 69	32	28 80	17 80	45	17 72	10 55
7	73 73	53 89	20	47 21	31 15	33	27 68	17 04	46	17 12	10 17
8	72 00	52 26	21	45 31	29 69	34	26 61	16 32	47	16 55	9 81
9	70 14	50 53	22	43 47	28 30	35	25 59	15 64	48	16 00	9 47
10	68 17	48 72	23	41 70	26 97	36	24 61	15 00	49	15 48	9 15
11	66 11	46 87	24	40 00	25 71	37	23 69	14 39	50	14 98	8 84
12	64 00	45 00	25	38 36	24 52	38	22 81	13 82			

ANNEXES

PONTS A VOÛTES

INARTICULÉES OU ARTICULÉES

DE 40ᵐ ET PLUS DE PORTÉE

ACHEVÉS APRÈS 1912

TABLEAUX SYNOPTIQUES

MONOGRAPHIES

PLEINS CINTRES

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *à 60° de la clef*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *à 60° de la clef*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATIO[N] DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
des **Eaux-Salées** *France* 1911-1914 **C**[1] F[r] (≥ 40m)[4]	*111m83* *3mm* *RG* *RD* 31m40	8m075 *8m17* Fruit : 1/40 1m085	50m,00 *25m00* *25m00*	1m,60 *3m20*	1m,65 *3m25*	Bandeaux, douelle et queutage en MAV[1] de 0m25 à 0m27 Calcaire de Châteauneuf-lez-Martigues (Bouches-du-Rhône) Poids 2700k Résistance 1300k *Au-dessus du joint à 80° 46' de la clef : ciment artificiel Lafarge de Valdonne 611k* *au-dessous : chaux « maritime » Lafarge 350k* *Comme sable, calcaire broyé.*	Max. β = 27k *Arc élastique* *Méthode de M. Résal* Surcharge de 10T par m. ct de voie Effort dû au freinage 10Ts	1° 10 voûte[s] transversal[es] vues, en plein cint[re] de 4m90, sur piles de 1m20 aux naissan[ces] 2° *Archivolt[e] de 0m40 d'épaisseu[r] à la clef 0m65 aux re[tombées] 0m20 de sai[llie] uniforme su[r] le bandeau*
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE								
sur la **Roizonne** *France* 1912-1915 **C**[1] f (≥ 40m)[2]	*231m52* *10mm* *RD* *RG* 110m	entre parapets 5m40 (chaussée de 4m30) *entre tympans* *1m50* *entre têtes de la grande voûte* *1m70* fruit : 1/40 1m40	79m,433 *Montée* *(de la clef aux retombées)* RD *36m83* RG *34m21* *40m00*	1m,65 *2m90*	1m,65 *2m90*	Bandeaux et douelle PT[1] Queutage au-dessus des joints à 60° de la clef gros MEV[1] au-dessous MOV[1] *Ciment artificiel Vicat 600k*	Pressions avec surcharge (MAX. / moy.) Clef : 22k3 / 22k2 ; Joint à 60° : 40k3 / 21k5 *Arc élastique* *Méthode de M. Résal* 3750k par m. ct soit 797k par m. q.	1° 8 voûtes transversal[es] vues, en plein cint[re] de 6m50, sur piles de 1m30 aux naissance[s] 2° »

1. Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome I, p. IV, n° 6.

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t_v' après t_v''	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
SÉRIE C^1 Fr (⩾ 40m) *Suite du tableau synoptique Tome I p. 38*								
Dolomie R D : plus haut que l'étiage *à sec* R G : à 22m *par épuisement en fouille blindée*	Fixe à rayons (Type Lavaur II p. 137) *Sapin* (*Dauphiné et Savoie*) Boîtes à sable	**7** *de rive :* 20^{cm} *interm.* 25^{cm} 1m50 »	Bois en élévat. 454mc en fondat. 29.5 483.5 mc 14263k 77033f	0mc78 0mc83 24k5 132f2	3 rouleaux au-dessus de 60° 9' 30" 1er rouleau 8 tronçons 15 clavages 2e 6 tronçons 7 clavages 3e 6 tronçons 5 clavages	Voûte nue *38 jours* 12 août	amont / aval (mm) t_c 29.2 / 32.8 t_v' 0.22 / 0.31 t_v'' apr. 6 jrs 0.25 / 0.17	Q = 11620mc Q : S_p = 12mc4 Q : W = 0mc67 **D = 998 209f** D : S_p = 1086f6 D : W = 58f D : Q = 85f9
SÉRIE C^1 fr (⩾ 40m) *Suite du tableau synoptique Tome I p. 52*								
Calcaire schisteux 12k en supposant la charge uniformément répartie sur la retombée de la voûte et le massif qui la bute)	Retroussé sur 63m60 (Type Luxembourg II p. 72bis) *Sapin du pays* Boîtes à sable	**4** *cerveau* 23^{cm} *chevalem*t 39^{cm} 1m60 0	250mc 94000k 70000f	0mc41 155k2 115f6	3 rouleaux Dans chaque rouleau, 6 tronçons clavés en même temps à la clef, aux reins, aux joints à 60° 1er rouleau 1 moellon Epaisseur moyenne 0m60 environ 2e rouleau 1 moellon au cerveau 2 moellons aux reins	Les piles des voûtes d'élégissement construites *41 jours* 7 septembre	t_c = 61mm t_v' = 6mm (amt) / 5mm (aval)	Q = 11950mc Q : S_p = 10mc64 Q : W = 0mc27 Q : W' = 0mc34 **D = 560000f** D : S_p = 498f7 D : W = 12f7 D : W' = 16f4 D : Q = 46f9 Cube de la grande voûte 1651mc *(Q, D, approximatifs : le décompte n'est pas arrêté)*

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome I page V, n° 7 — A. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome I, page V, n° 7 — *B*.

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	*Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée ou du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets, *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée ou du rail sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons de courbure : à la clef, aux naissances*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Milieu de la montée*	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Reins*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
EN DEUX ANNEAUX SOUS ROUTE								
de **l'Hôtel-Dieu à Lyon** *France* 1912-1916 **E**ⁿ **E**ⁿ r.te (⩾ 40m)2 *4 arches en ellipse de 42m, 45m, 49m, 45m* *2 voûtes de décharge en ellipse* RD — *7m50* RG — *11m00*	*227m50* Parabole RD 86mm RG 88mm 11m79 (étiage)	20m10 (chaussée de 11m) *Largeur : des anneaux en douelle, à la clef* *5m05* *du vide entre eux* *10m80* Pas de fruit 1m00	Ellipse 1 RD **42m,00** *7m77* $\frac{1}{5,405}=0,185$ *15m00* *3m50*	**1m,25** *1m75*	**1m,00** *1m75*	Bandeaux et douelle en PT[1] calcaire de Villette (Ain) Sable de Saône *Ciment artificiel Lafarge 600k*	Pressions MAX. clef 35k9 reins 39 6	1° Voûtes transversales vues, en arc de cercle de 2m00 à 1 5 sur piles de 0m70 2° »
			2 **45m,00** *9m04* $\frac{1}{4,978}=0,200$ *45m00* *4m06*	**1m,25** *1m475*	**1m,00** *1m475*		clef 32k3 reins 40 9	
			3 **49m,00** *9m54* $\frac{1}{5,136}=0,195$ *48m00* *4m00*	**1m,25** *1m62*	**1m,00** *1m62*		clef 33k reins 40	
			4 RG **45m,00** *9m04* $\frac{1}{4,978}=0,200$ *45m00* *4m00*	**1m,25** *1m475*	**1m,00** *1m475*		clef 32k3 reins 40 9 *Méthode de M. Résal* 600k par m. q.	
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
de **Courris** *France* 1912-1916 **E**ⁿ Fr (> 40m)2 *3 voûtes égales*	*159m02* » 18m55	4m50 *1m30* Pas de fruit 1m	Ellipse **40m,00** *16m25* $\frac{1}{2,461}$ = 0,406 *24m615* *13m203*	**1m,30** *2m40* l'arc d'extrados est une ellipse concentrique	**1m,30** *2m 10*	Bandeaux et douelle MAV[1] Queutage : au dessus du milieu de la montée MEV[1] au-dessous MOV[1] *Ciment 600k*	Pressions (MAX. / moy.) clef 15k7 (extr.) / 13k3 au 1/4 de la montée 19k5 (intr.) / 11k2 au milieu de la montée 10k8 (intr.) / 10k3 *Méthode de M. Résal* 1180k par m. q. de plate-forme sur toute la voûte	1° au-dessus des reins des 3 grandes voûtes, 2 voûtes transversales vues, en plein cintre de 3m. sur piles de 0m95 aux naissances 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome I, page IV, n° 6.

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
SÉRIE E^{n} E^{n} r^{te} ($\geqslant$ 40^{m}) *Suite du tableau synoptique, Tome I, p. 190*								
Gros gravier et sable 10 à 12^{m} sous l'étiage (6 à 10^{m} dans le sol) Pression maxima 12^{k}39 *Air comprimé*	*Métal* Boites à sable dans des caissons en bois remplis de paraffine	4 » 1^{m}55 *15^{mm} à 25^{mm}*	372426^{k}		3 rouleaux aux reins 2 au cerveau 1er rouleau : 6 taquets, 4 assises à sec	Anneau: amont / aval	t'_v Anneau: amont / aval	
						1 R D		
						2 (3 étant clavée): amont *13 j.* 17 mars / aval *27 j.* 27 avril	amont 13.2^{mm} / aval 8.^{mm}	
						3 (1 clav.): amont *10 j.* 14 mai / aval *31 j.* 23 mai	amont 2.4^{mm} / aval 2.^{mm}	
						4 R G Voûte de décharge clavée: amont *33 j.* 19 juin / aval *38 j.* 12 juil.	amont 1.4^{mm} / aval 0.2^{mm}	
SÉRIE E^{n} F^{r} ($\geqslant$ 40^{m}) *Suite du tableau synoptique, Tome I, p. 222*								
Rocher (schiste) 2^{m}30 *Épuisements dans un batardeau pour une pile*	Fixe type Antoinette *Sapin* Boites à sable	4 *25^{cm}* 1^{m}37 *30^{mm}*	81^{mc}13 3547^{k} 8344^{f} **Un seul cintre pour les 3 voûtes**	0^{mc}37 16^{k}3 38^{f}25	2 rouleaux 1er rouleau 11 clavages (coffrages, taquets, cales... comme aux ponts de Lavaur (II p. 139), Antoinette (II p. 147)	On a décintré le 1er rouleau : Voûte 3 *à 37 jours* 23 novembre Voûte 1 *à 30 jours* 20 mai Voûte 2 *à 43 jours* 10 septembre	t_c = 30^{mm} t'_v (1er anneau) Voûte { 3 — 14^{mm} / 1 — 12 / 2 — 9	

[2] Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome I, page V, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome I, page V, n° 7 *B*.

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons: cerreau reins*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/$\overline{0^{m}01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
de **Niagara** *Norvège* 1914-19.. $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr (⩾ 40m) 12	*75m50* 7mm5 »	5m90 *5m30* Fruit $\frac{1}{30}$ 1m60	Arc d'anse de panier à 3 centres **42m,00** *13m00* $\frac{1}{3,23}$ = 0,31 *22m50* *24m818*	1m,60 *2m00*	1m,60 *2m00*	Bandeaux, Douelle PT[1] Granit 1420k à 1575k *Ciment 560k*	Pressions maxima : avec surch. / sans surch. Clef 17k / 11k6 Reins 28 / 17.5 Retomb 31.5 / 17 » 15T par mètre courant	1° Voûtes en plein cintre de 3m50 sur piles de 1m... 2° »
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE								
Sur la **Vouga** *Portugal* 1913 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ fr (⩾ 40m) 5	*168m* 0 29m	3m60 *3m10* à la clef Fruit $\frac{1}{30}$ 0m90	Arc d'anse de panier à 3 centres au niveau des fondations **55m,70** *27m00* $\frac{1}{2,266}$ = 0,449 *24m70* *33m20*	1m,20 *à 6m au-dessus des fondations* *2m60*	1m,20 *2m60*	Bandeaux et douelle MEV[1] (granit) Queutage MOV[1] *Ciment 350k*	Pressions maxima [6] (Clef / Reins à 52° et 20m90 de la clef / Retombées): Charge permanente..... 15k / 23k / 14k Charge et surcharge — Sur toute la voûte 21 / 23 / 16 Sur la ½ voûte — Côté chargé 20 / 24 / 17 Côté non chargé 20 / 22 / 15 Celles du règlement français du 29 août 1891.	1° Voûtes en plein cintre de 10m20 sur piles de 1m2 aux naissances 2° »
de **Pélussin** *France* 1914-1916 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ fr (⩾ 40m) 6	*169m50* 30mm environ 58m50	entre parapets 4m *entre tympans* *2m90 à 3m00* *Entre bandeaux* *3m* Fruit : $\frac{1}{50}$ 0m805	Arc d'anse de panier à 3 centres **55m,00** *24m70* $\frac{1}{2,266}$ = 0,449 *24m70* *33m20*	1m,40 aux reins 2m10 *3m80*	1m,40 aux reins 2m10 *3m80*	Bandeaux et douelle MEV[1] (calcre de Sénozan) Queutage MOV[1] (granit) *Ciment 300k*	Pressions (MAX. / moy.) Sans surcharge Clef 21k8 / 17k9 Reins 20.2 / 13.0 Retomb. 13.0 / 10.3 Avec surcharge Clef 22k0 / 20k9 Reins 25.0 / 14.8 Retomb. 17.8 / 11.8 *Arc élastique: lignes d'influence* Celles du règlemt du 29 août 1891	1° Voutes transversales vues, en plein cintre de 10m00 sur piles de 1m4 aux naissances 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome II, p. II, n° 6.
6. — Calculées par M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m) *Suite du tableau synoptique Tome II, p. 122.*								
Rocher 16k	» » Boites à sable	5 » 1m40 »			2 rouleaux			
SÉRIE $\widehat{A}^1$ fr ($\geqslant$ 40m) *Suite du tableau synoptique Tome II, p. 180.*								
Granit	à rayons *Bois* Boites à sable	4 *20cm* 1m40	180mc 2800k	0mc58 89k7	1 rouleau de moellons 5 joints secs	Voûte nue *8 jours*	t_c = 40mm t'_v = 0mm5	Q = 3670mc Q : S_p = 6mc07 Q : W = 0mc31
Granit » » *A sec*	Retroussé sur 34m contrefiches rayonnant en éventail de deux piles voisines des culées *Bois* Boites à sable et vérins à vis	3 *Cerveau 20cm* *Etage inférieur 24cm* 1m50 *0m10*	189mc6 2916k 39201f	0mc57 87k3 117f4	3 rouleaux 1 rouleau de moellons 2 rouleaux de queutage 5 joints secs	Piles des voûtes d'évidement construites *40 jours* 12 Novembre	t_c = 48mm t'_v = 0	

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome II, p. III, n° 7 — A. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome II, p. III, n° 7 — *B*.

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée ou du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée ou du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons:* *cerveau* *reins*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1ᵐᶜ de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
EN DEUX ANNEAUX SOUS ROUTE								
de **Villeneuve** *France* 1914–1916 $\widehat{A}^1\widehat{A}^1$ r[le] (⩾ 40m)[1]	*123ᵐ15* » 17ᵐ41	10ᵐ90 (Chaussée de 7ᵐ30, 2 trottoirs de 1ᵐ80, voie du tramway au milieu) *10ᵐ90* » 0ᵐ57	Pour l'intrados voir la monographie 96ᵐ25 aux naissances 97ᵐ45 aux fondations *15ᵐ455* $\frac{1}{6,228} = 0,1606$	1ᵐ45 *2ᵐ à 44ᵐ de la clef*	1ᵐ45 *2ᵐ à 44ᵐ de la clef*	Béton Gravier tout venant du Lot 1ᵐᶜ *Ciment 350ᵏ* *[Ciments français de Boulogne. Usine de la Souys près de Bordeaux]*	Compressions maxima Sans surcharge / Avec surcharge: Clef 42ᵏ / 51ᵏ Reins 39 / 57 Appuis 23 / 34 *Arc élastique (Méthode des courbes d'influence)* *On a tenu compte des variations de longueur dues aux changements de température,* $\frac{75}{10^6}$ *autour de la moyenne pour des oscillations de* ± 25° Celles du règlemᵗ du 29 août 1891.	1° Voûtes en plein cintre de 3ᵐ35 environ, sur piles d'épaisseurs croissant en s'éloignant de la clef, de 0ᵐ50 à 0ᵐ[illegible] 2° *Petites moulures et creux dans les bandeaux*
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
d'**Orkla** *Norvège* 1911–1915 $\widehat{A}^1$ Fʳ (⩾ 40m)[26]	*86ᵐ* 0 47ᵐ	4ᵐ84 *1ᵐ20* Fruit : $\frac{1}{30}$ 1ᵐ60	Arc d'anse de pan. 60ᵐ00 *13ᵐ70* $\frac{1}{4.38} = 0.228$ *47ᵐ50* *31ᵐ17*	1ᵐ80 *3ᵐ30*	1ᵐ80 *3ᵐ30*	Bandeaux et douelle : PT¹ granit blanc Résistance (1150ᵏ à 1500ᵏ) Queutage : L¹ *Ciment 560ᵏ*	MAX. en tenant compte des changements de température Sans surcharge / Avec surcharge: Clef 41ᵏ / 45ᵏ Reins 37 / 51 Retomb. 35 / 47 *Arc élastique* 15ᵀ au m. cᵗ	
de **Dombaas** *Norvège* 1913–19.. $\widehat{A}^1$ Fʳ (⩾ 40m)[27]	*85ᵐ5* 0 34ᵐ60	4ᵐ80 *1ᵐ20* Fruit : $\frac{1}{30}$ 1ᵐ80	Arc d'anse de pan. 54ᵐ00 *11ᵐ40* $\frac{1}{4.74} = 0.21$ *39ᵐ00* *36ᵐ415*	1ᵐ90 *2ᵐ20*	1ᵐ90 *2ᵐ20*	Bandeaux et douelle : PT¹ Granit blanc (1000ᵏ) Queutage : L¹ *Ciment 560ᵏ*	Pression maxima Sans surcharge / Avec surcharge: Clef 16ᵏ5 / 29ᵏ2 Retomb. 20 8 / 49 1 15ᵀ au m. cᵗ	1° 6 voûtes en plein cintre de 3ᵐ50 sur piles de 1ᵐ40 d'épaisseur 2° »
de **Gulfos** *Norvège* 1913–19... $\widehat{A}^1$ Fʳ (⩾ 40m)[28]	*77ᵐ* 0 19ᵐ50	4ᵐ90 *1ᵐ30* Fruit : $\frac{1}{30}$ 1ᵐ60	Arc d'anse de pan. 46ᵐ00 *9ᵐ70* $\frac{1}{4.74} = 0.21$ *36ᵐ50* *28ᵐ134*	1ᵐ60 *1ᵐ90*	1ᵐ60 *1ᵐ90*	Bandeaux et douelle : PT¹ Granit (1240ᵏ à 1890ᵏ) Queutage : L¹ *Ciment 560ᵏ*	Pression maxima Sans surcharge / Avec surcharge: Clef 18ᵏ6 / 32ᵏ4 Retomb. 13 5 / 44 7 15ᵀ au m. cᵗ	1° 6 voûtes en plein cintre de 3ᵐ40 sur piles de 1ᵐ40 d'épaisseur 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations voir Avertissement, Tome III, page II, nº 6.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXECUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							DÉPENSE D
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois / Poids de fer / Dépenses					
Nature du sol / Profondeur sous l'étiage / Pressions sur le sol en kg $\overline{0^m01}^2$ / *Procédé*	Type / *Matière* / Appareils de décintrement	Nombre / *Épaisseur* / Écartement d'axe en axe / *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont / *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* / Date	sur cintre t_c / au décintrement t'_v / après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
SÉRIE $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r^te (⩾ 40m)								*Pour la série $\widehat{A}^1$ r^te (⩾ 40m) suite du tableau synoptique, Tome III, p. 16.* *Pour la série $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r^te (⩾ 40m) suite du tableau synoptique, Tome II, p. 64.*
			Pour les deux anneaux					
Grès marneux (Mollasse) / 2m10 à 3m20 / *Épuisements*	Poteaux et contrefiches (V. p. 135, 137) / Pas d'appareil de décintrem^t dans le cintre	2 fermes par anneau de 3m / On a construit en même temps les 2 cintres : on a été ainsi plus vite et par conséquent moins exposé aux crues du Lot. / *20cm* / 1m80	405mc environ / 7.900k environ	0mc64 / 12k5		Voûtes nues / *31 jours*		D (à forfait) = 430.000f / D : S_p = 319f6 / D : W' = 23f2
SÉRIE $\widehat{A}^1$ F^r (⩾ 40m) *Suite du tableau synoptique Tome III, p. 90.*								
Rocher / » / 25k / »	Retroussé sur 37m50 / Contrefiches, partant en éventail de chaque rive, soutenant une poutre en bow-string à treillis en N. / *Bois en grume* / Boîtes à sable sur coins.	7 / » / 0m80 / *60mm*	780mc / 83.340f	2mc10 / 224f9	3 rouleaux en plusieurs tronçons	Les tympans exécutés à moitié / » / 4 novembre	t_c = 10mm / t'_v = 4mm	Q = 2700mc / Q : S_p = 6mc60 / D = 333.360f / D : S_p = 814f8 / D : Q = 123f5
Rocher / » / 27k / »	Retroussé / Fermes à 3 articulations / Coins	5 / » / 1m / *62mm*	34.725f	109f93	3 rouleaux en plusieurs tronçons			
Rocher / » / 25k / »	Retroussé / Fermes à 3 articulations / Coins	5 / » / 1m10 / *50mm*	27.780f	106f18	2 rouleaux : un en 12 tronçons			

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — A. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — B

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

PONT - Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la voie au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs (entre parapets / *entre tympans sous la plinthe*) Fruit des tympans Revanche de la voie portée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons :* *cerveau* / *naissances*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Retombées*	COMMENT SONT ARMÉES LES VOÛTES	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg / $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
EN DEUX ANNEAUX SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
Sur le **Tunkhannock Creek** près de **Nicholson** *Etats-Unis* 1912-1915 *10 arches en plein cintre de 54m864 et 2 arches de rive de 30m18 (faisant office de culées évidées)*	*679m70* 5mm2 73m15 au-dessus de l'eau	10m,36 2 voies *Anneaux, en douelle à la clef* *4m267* Vide entre eux 1m829 Chaque anneau porte une voie. Pas de fruit.	Pleins cintres 54m,864	2m,438 *5m,182 aux naissances des piles*		Béton Ciment 1v Sable 3v Cailloux 5v	Surcharge sur chaque voie : train de 9T par mètre, traîné par 2 machines : soit Mikado pesant chacune 211T soit Mallet pesant chacune 272T5	1° Viaduc en béton arm à 11 arches en plein cintr sur le dos des grandes voûtes. Piles distantes de 5m18 d'ax en axe. Parapet en béton arm de 0m91 d'épaisseur, 1m22 de hauteur. 2° *Les fûts des piles sont rayés de str horizontales tous les 1m22*
Sur le **Martin's Creek** ligne de Clark Summit à Halstead. (Delaware Lackawanna and Western RR, Cy). *Etats-Unis* 1913 *11 arches 9 en anse de panier : 7 de 45m72, 2 de 30m50 ; 2 en plein cintre de 17m25*	*491m55* » 45m75 au-dessus du thalweg.	14m54 3 voies *Anneaux en douelle à la clef* *5m338* Vide entre eux 3m66	Anses de pan. à 3 centres 45m,72 *17m98* $\frac{1}{2{,}543}$ = 0,393 *25m* *12m10*	1m,83		Béton Ciment 1v Sable 3v Cailloux 5v		1° Viaduc en béton arm à 10 arches en arc sur le dos des grandes voûtes. Piles distantes de 4m76 d'axe en ax 2° »
EN QUATRE ANNEAUX SOUS ROUTE								
Sur le **Latah Creek** à **Spokane** *États-Unis* 1911-1913 *Chaussée et 2 voies de tramway en 4 anneaux 7 arches en anse de pan. 2 de 45m72, 2 de 41m18, 1 de 39m et 2 de 46m47.*	*286m70* » 42m40 au-dessus du sol.	(Chaussée de 13m725, 2 trottoirs de 2m135). *Anneaux en douelle à la clef, 2 de 1m525 2 de 1m83* Vide entre eux 3m353, 3m81 3m353	Anses de panier 45m,72 *19m51* $\frac{1}{2{,}343}$ = 0,427	1m,14		Béton		1° Arches en plein cintre sur le dos des grandes voûtes 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page 11, n° 6.

TABLEAU SYNOPTIQUE

Suite du tableau synoptique, Tome III, p. 286.

FONDATIONS	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES							CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg. 0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Sable pur mouillé, puis rocher. 91m44 du parapet au point le plus bas des fondations. Aux piles 3 à 8, profondeur jusqu'à 30m48 sous le sol, 9m80 sous l'eau. *Épuisements.* *Fouilles dans des caissons sans fond à parois faites de palplanches métalliques.* *Béton dans ces caissons.*	*Cintre métallique pour 1 anneau, transporté sous l'autre.*	4 » 1m17 Un jeu de 5 cintres *76mm*			Tranches séparées par des vides remplis 7 jours après		t_c de 35mm à 60mm t'_v Sur 1 voûte 6mm4 Sur 3 voûtes 3mm2 Sur les 16 autres 0	Environ 123849mc de béton 1000T de fer pour armatures.
Sable et grosses pierres puis rocher 5m50 à 21m35 sous le sol *Fouilles dans des caissons métalliques comme au viaduc de Tunkhannock*	*Cintre métallique pour 1 anneau, transporté sous l'autre*	4 » » Un jeu de 4 cintres	700.000k		Tranches séparées par des vides remplis après	*30 jours sur cintre*		Cube du béton : Chaque anneau des grandes voûtes 765mc Q = 64260mc (envir.) SOURCES : S_1 — Engineering Record, 27 décembre 1913, p. 710. S_2 — Voir photographies du viaduc dans le supplément au "The Engineer", 17 mars 1916.
Roc ou sable très compact » Sur le sable on a étalé le poids par de larges empattements 6k4	Fixe *Bois*				Anneaux construits par paire, chaque anneau par tranches avec vides à la clef et aux reins remplis après		t_c = 18mm3	SOURCES : S_1 — Engineering Record, 22 mars 1913, p. 312.

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FE[R]

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage 2	ENSEMBLE Largeurs entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados 3	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons* 4	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées 5	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Cannstatt** *Wurtemberg* 1911-1914 $\overleftrightarrow{\mathbf{A}}^{n}$ F^{r} (> 40m)[1] *Rive gauche : voûte en béton armé de 16m* *Corps central : 3 voûtes en béton à 3 articulations de 56m60, 61m60, 55m90.* *Rive droite : 2 voûtes en béton de 17m, une voûte en béton armé de 20m.*	*322m30* 5mm G *RG* *RD*	(4 voies) Largeur entre parapets : 17m,90 à une extrémité 24m à l'autre 15m au milieu de l'arche en rivière Fruit variable	Arcs de 75m de rayon à la clef, surbaissés au $\frac{1}{10}$. Voûte de RG : Entre appuis 56m,60 Entre axes des rotules 49m Voûte centrale : Entre appuis 61m,60 Entre axes des rotules 54m Voûte de RD : Entre appuis 55m,90 Entre axes des rotules 49m	1m,48 1m,86 *(au 1/4 de l'arc)* 1m,56 1m,73 2m *(au 1/4 de l'arc)* 1m,86 1m,48 1m,86 *(au 1/4 de l'arc)* 1m,56	Rotules en acier moulé Siemens-Martin non trempé maintenues transversalement par des goujons de 50mm Rayons des surfaces 600mm, 750mm. Elles sont polies sur 150mm Acier à 45k 12 % d'allongement sur 200mm Pression maxima sur la bande de contact 30k5/$\overline{0,001}^2$ (formules de Hertz IV., p. 11). Travail maximum des goujons au cisaillement 7k8 167 couples de rotules. Ils pèsent : les plus lourds 1.708k, les plus légers 1.110k, Ensemble 233T Sommiers d'appui en béton non armé à 1 : 2 : 2 Travail : 75k sous les rotules.	Béton pilonné à l'air comprimé. Pour 1v de ciment Sable..... 2v Gravier... 3v5 Muschelkalk cassé (25mm à 45mm).... 2v5 (Gravier + Muschelkalk : 8v) Ciment Dyckerhoff.	Pressions maxima dans la voûte en rivière, surchargée : Clef........ 50k6 1/4 de la portée..... 49 1 Retombée ... 45 1 Pour tenir compte des efforts latéraux (chocs, force centrifuge, vent) on n'a compté la voûte que pour les 95 % de sa largeur réelle 2 locomotives à 5 essieux de 85T nombre illimité de wagons : les 4 ou 2 voies chargées dans les conditions les plus défavorables. Force centrifuge pour une vitesse de 80 kilomètres Effet des chocs latéraux 8 %. Freinage au 1/6 du poids freiné. Vent de : 150k pont chargé 250k pont vide. Pression des hautes eaux et des glaces 600k par mq. de surface de pile.	1° Vides au-dessus des piles, entre les rotules, entre des cloisons et sous un tablier en béton armé.

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

Pour les voûtes sous route à articulations roulantes, en arcs très surbaissés, série $\overline{A}^{n}$ r^{te} ($\geqslant$ 40m), *suite du tableau synoptique, Tome IV, p. 172.*

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
2m environ d argile et de vase, ns 3 à 4m50 de gravier compact : dessous, marne dure calcaire. *Dans quelques fouilles, dégagement de carbonique.* Plus grande profondeur sous l'eau 6m Pression maxima sur le sol 6k9 *culées sur ier général.* *les fondées sur la marne par puisements dans des bâtardeaux rideau de palplanches métalliques.*	Fixe Poteaux et contrefiches isolées (type P. C. V. p. 135, 137) » Vérins à vis.	Voûte rive droite (un anneau) **10** fermes les autres **8** » » *Surhaussem^t 1er Anneau* Voûtes de rive / central^t (mm): *Clef* 60 / 70 *rotules de retombées* 20 / 20 *Naiss^ces* 0 / 0 *2e Anneau (d'après les abaissements constatés au 1er)* 55mm à la clef.			A pleine épaisseur en 20 tranches.	Tympans, parapets et trottoirs posés. *On décintra : le 1er anneau (moitié sud) le béton ayant 74 jours.* 30 Août *le 2e à 47 jours.*	t'_v et t''_v pendant 5 jours 1er ann. / 2e ann. / Calculé (mm): Vte R G 15 / 16 / 20 en rivière 26 / 29 / 25 Vte R D 12 / 15 / 20 Recul des piles culées Piles culées: 1er ann. / 2e ann. am^t / aval (mm): R G 1,7 / 0,1 / 1 R D 1,9 / 0,1 / 1,2	Cube de béton : Fondations............ 17700me Élévation: Piles et tympans... 8100 Voûtes non armées 8150 Voûtes armées .... 760 Cloisons d'évidem^t 640 Le reste........... 5150 Total Q = 40500me **D = 1.974.400f** D : S_p = 327f5

ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV page III, n° 7 — A.   3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets.   5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, page III, n° 7 — *B.*

PONTS A VOÛTES DE 40ᴹ ET PLUS ACHEVÉS APRÈS 1912

MONOGRAPHIES

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE
PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE
SÉRIE C^1 F^r ($\geqslant$ 40ᵐ)

(Voir tableau synoptique I. p. 38 et monographies I. p. 41 à 50)

PONT SUR LA « CALANQUE » DES EAUX-SALÉES *(BOUCHES-DU-RHÔNE)*

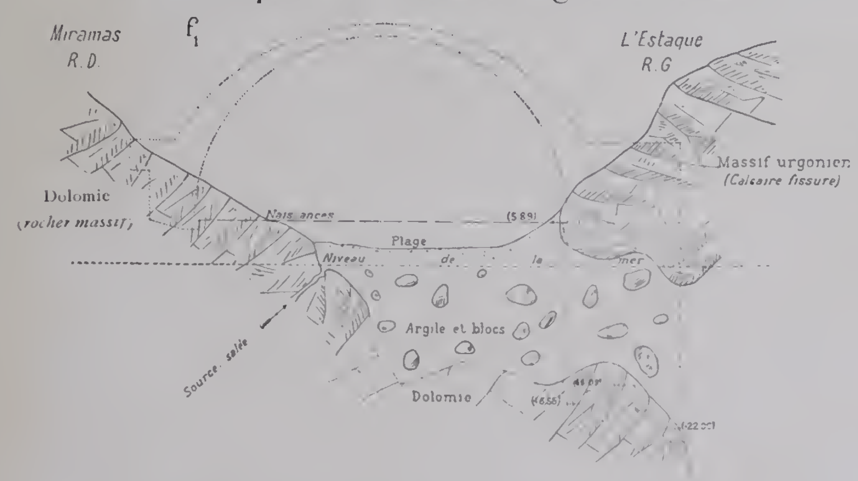
Ligne de Miramas à L'Estaque

1911-1914 — C^1 F^r ($\geqslant$ 40ᵐ)[4]

Φ_1 — aval — Juin 1915.[1]



1. Pourquoi on a fait une grande arche. — Le creux est comblé de blocs de rocher noyés dans de l'argile : on n'y pouvait pas fonder (f_1).

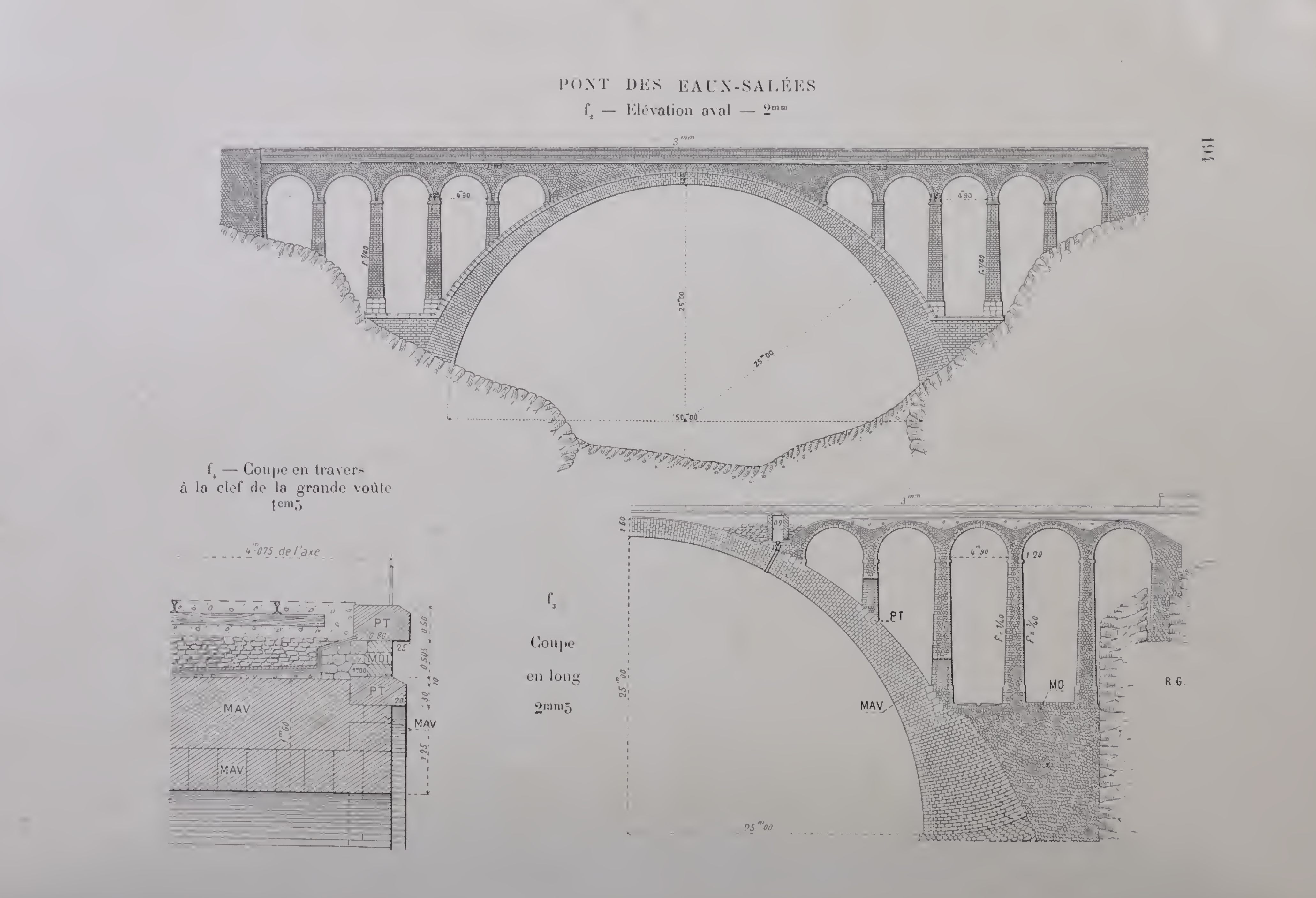


Le rocher RD — dolomie — est troué de cavernes : en bas sourd une abondante source salée.[2]

Le rocher RG est un bloc charrié : il a fallu descendre à 22ᵐ sous la mer.

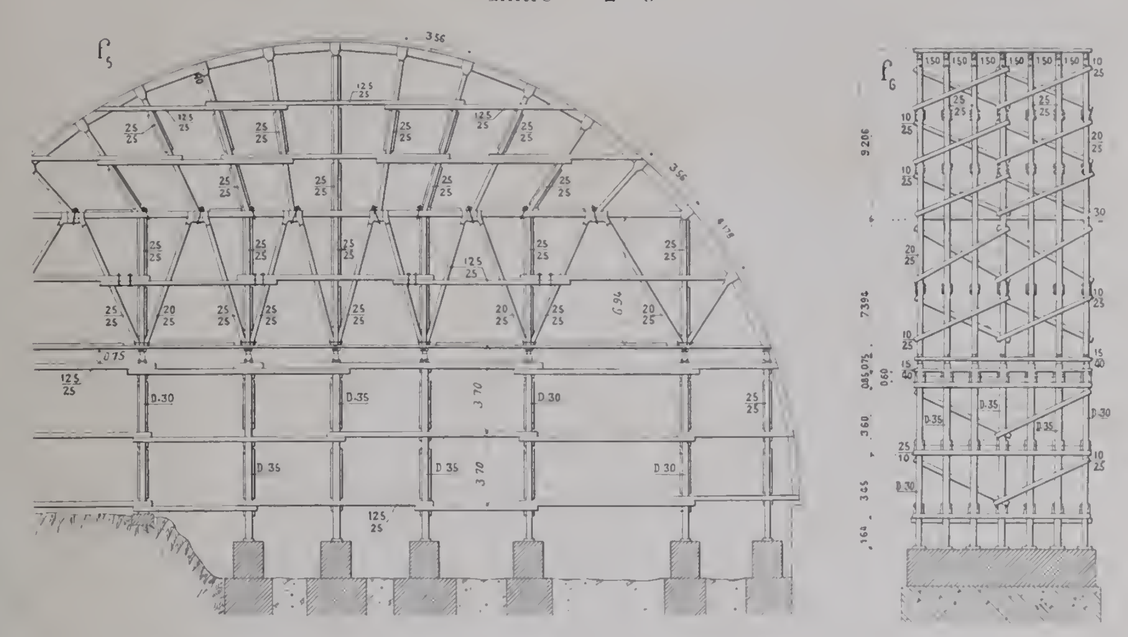
1. — Cliché de M. Bertrand, Sous-Chef de section de la Cie P.-L.-M.

2. — Débit 500ˡ à 1500ˡ par 1" — Température constante 22°.



PONT DES EAUX-SALÉES
f_2 — Élévation aval — 2mm
3mm
4,90
4,90
f. 1/40
f. 1/40
25,00
25,00
50,00
f_4 — Coupe en travers à la clef de la grande voûte 1cm5
4,075 de l'axe
PT
MOI
PT
MAV
MAV
MAV
0,80
0,50
0,505
25
1,00
10
30
20
60
125
f_3
Coupe en long 2mm5
3mm
1,60
4,90
1,20
f = 1/40
f = 1/40
PT
MO
MAV
R.G.
25,00
25,00

Cintre — $2^{mm}5$



2. Cintre. — C'est le cintre du Pont de Lavaur.[3] — On l'a calculé pour la demi-épaisseur de la voûte par les formules employées à Lavaur.[4]

Les vaux sont en 2 pièces boulonnées.

6 palées reposaient sur des massifs de béton fondés sur pieux battus dans l'argile.

Un transporteur à câble a monté le cintre, et plus tard amené les matériaux.

Coût du cintre :

	Main-d'œuvre	Fournitures	Ensemble
Fondations.	8.415f41	11.480f75	19.896f16
Élévation.	10.941 90	46.195 23	57.137 13
Totaux	19.357f31	57.675f98	77.033f29

3. Fondations. — *A. Culée Miramas.* Une caverne sous la fouille a été bourrée de béton de ciment.

B. Culée L'Estaque. (21 mars 1911 — 15 novembre 1912). A l'arrière, la fouille a 45^m de haut, dont 20^m dans l'argile.

Pour la boiser, on a employé 599^{mc} de sapin en grume, 4451^{mq} de planches de 4^c.

Une source qui jaillissait d'une paroi a été aveuglée par des feuilles de tôle coaltarée.

On a taillé en gradins le rocher, très incliné, de la base.

Un angle, où l'on ne pouvait épuiser, a été rempli de sacs de mortier de ciment. Jusqu'à — 2^m83, on a employé du béton très gras. (1^{mc} de pierre cassée, $0^{mc}66$ de mortier à 550^k de ciment artificiel Lafarge de Valdonne pour 900^l de sable).

3. — II, p. 137. 4. — V, p. 155.

On a noyé des assises de vieux rails (f_7) :

1° Au-dessus des gradins de fondation pour y étaler la pression.

2° Tous les 1m50 de hauteur, pour relier au corps la face antérieure de la culée.

f_7

4. Exécution de la grande voûte (f_8). — Même méthode qu'au pont de Lavaur[5].

f_8 — Exécution de la grande voûte
5mm

A. — Épaisseur des rouleaux.

		1er rouleau		2e rouleau		3e rouleau	
		Maxima	Minima	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Corps de la voûte.	à 60°	1m40	1m20	0m80	0m80	1m20	1m00
	à la clef.	0 80	0 60	0 40	0 40	0 60	0 40
Bandeaux.........	à 63°	1 40	1 20	0 80	0 80	1 25	1 05
	à la clef.	0 80	0 60	0 65	0 45	0 40	0 40

B. 1er rouleau. — Les tronçons **I** achevés, on chargea le cintre sur 20° de chaque côté de la clef, de 80mc de moellons, — à peu près l'épaisseur du 1er rouleau.

I et **II** étaient sur coffrages, **III** et **IV** sur taquets.

On clava en descendant de la clef jusqu'à 16°44', puis en montant des retombées.

5. — II, p. 139.

Avant le clavage, les bandes de plomb de l'intrados étaient matées au refus, le joint nettoyé et lavé à grande eau.

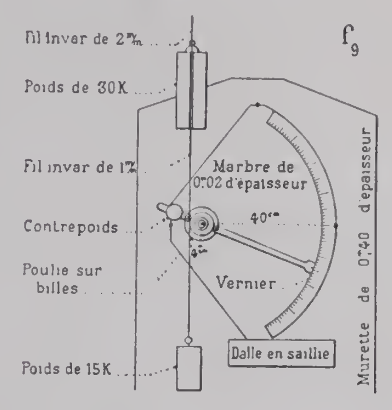
On matait les joints d'un moellon 2 jours après sa pose.

C. 2e et 3e rouleaux. — On les clava à partir de la clef.

D. Mortier de matage.

Sable de calcaire broyé	900[l]
Ciment artificiel Lafarge de Valdonne	550[k]
Eau	165[l] [6]

5. Tassements. — Sur chaque tête, à la clef, à 33°27'40" côté Miramas, à 25°5'31", côté l'Estaque, un fil « invar » de 2mm transmettait les tassements à un cadran (f_9) scellé dans un massif.



Voici les tassements observés :

Dates	Rouleau	Phases de la construction	A 33° 27' 40" Côté Miramas — Amont	A 33° 27' 40" Côté Miramas — Aval	Clef — Amont	Clef — Aval	A 25° 5' 31" Côté L'Estaque — Amont	A 25° 5' 31" Côté L'Estaque — Aval
26 Avril	1er rouleau	Tronçons I achevés.	0	0	0	0	0	0
2 Mai		Cerveau du cintre chargé	2.5 mm	2.6 mm	10.7 mm	11.9 mm	6.4 mm	5.6 mm
5			5.2	5.4	14.1	15.0	9.5	9.0
13		Clavages	15.7	17.0	23.8	25.7	22.9	22.9
14			15.9	17.0	23 7	25.7	22.9	23.0
19			17.8	18.9	26.3	28.0	25.6	25.0
20			18.7	19.8	27.2	28.8	26.8	26.2
21	2e rouleau		19.3	20.3	27.4	29.2	27.4	27.0
22			19.4	20.5	27.2	29.2	27.4	27.1
2 Juin			20.7	21.6	27.4	29.9	27.9	28.0
3		Clavages	20.8	21.6	27.6	30.2	27 9	28.0
4			20.9	21.6	27.8	30.3	28.0	28.0
7	3e rouleau	Exécuton des tronç. VIII	21.1	22.0	28.2	30.5	28.3	28.8
12			21.9	22.9	28.3	31.0	28.9	29.5
13		On fixe à la douelle les fils invar amt	22.1	23.1	28.4	31.2	28.9	29.8
14			22.3	23.2	28.4	30.9	29.0	29.7
16		On fixe à la douelle les fils invar avt	22.4	23.5	28.3	31.2	29.0	29.8
28			23.5	24.7	28.8	32.2	29.8	30.6
1er Juillet		Clavages	23.6	24.8	28.9	32.4	29.9	30.6
4			23.8	24.8	29.0	32.4	29.9	30.8
15			24.64	25.18	29.21	32.7	30.12	31.09
12 Août	Avant	décintrement	26.32	25.85	29.15	32.8	30.38	31.56
	Après	décintrement	26.38	25.86	29.37	33.11	30.49	31.67
18			27.25	26.12	29.62	33.28	30.63	31.83

6. — Au lieu de 231[l] pour le mortier ordinaire. (voir V, p. 166).

Tassements au décintrement.

		Tête amont	Tête aval
Clef		0mm22	0mm31
Joint à	23° 27' 40" de la clef. Côté Miramas	0, 06	— 0, 01
	25° 5' 31" — id. L'Estaque	0, 11	— 0, 11

Au clavage, il a plu, puis a soufflé le mistral qui a desséché le bois et commencé le décintrement.

6. Quantités et dépenses.

		Cubes	Prix			Prix de revient du mc.
			Main-d'œuvre	Fournitures	Ensemble	
Fouilles	Culée l'Estaque	4160mc	119.952f79	101.161f61	221.114f40	53f15
	Autres fouilles	9433	42.916 35	23.292 10	66.208 45	7 02
Maçonneries	Fondations de la culée l'Estaque	4160	17.662 13	79.287 20	96.949 33	21 66
	Autres maçonneries	7460	153.296 18	366.955 46	520.251 64	69 77
Cintres			60.342 69	33.342 31	93.685 00	» »
			394.170f14	604.038f68	998.208f82	

7. Quelques prix d'unité.

A. — *Matériaux à pied d'œuvre*

Bois de charpente	le mc	75f
Sapin en grume	—	70
Planches de 4cm	le mq	2 50
Ciment artificiel Lafarge de Valdonne	la tonne	50f
Chaux de Lafarge maritime	—	42
Chaux de Lafarge administrative	—	33
Sable de calcaire broyé	le mc	5

Moellons	bruts (des tranchées)	2f
	équarris	16
	d'appareil	52 / 65
	— grande voûte	80
Libages		70
Pierre de taille	de Châteauneuf	80
	de Ruoms	105

B. — *Salaires (Prix de l'heure)*

Chef charpentier, mécanicien, maçon	1f
Chef de chantier	0.90
Tailleur de pierre	0.80
Charpentier	0.75
Maçon	0f73
Mécanicien	0.70
Mineur, boiseur	0.52
Terrassier, manœuvre	0.45

8. Personnel (Cie P.-L.-M.)

Ingénieur en Chef : M. Canat.
Ingénieur : M. Delaly.
Chef de section : M. Gay.
Sous-Chef de section : M. Bertrand.
Entrepreneurs : MM. Ruvenhorst et Milliat.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SÉRIE C[1] fr (⩾ 40m)

(Voir tableau synoptique I. p. 52 et monographies I. p. 55 à 58)

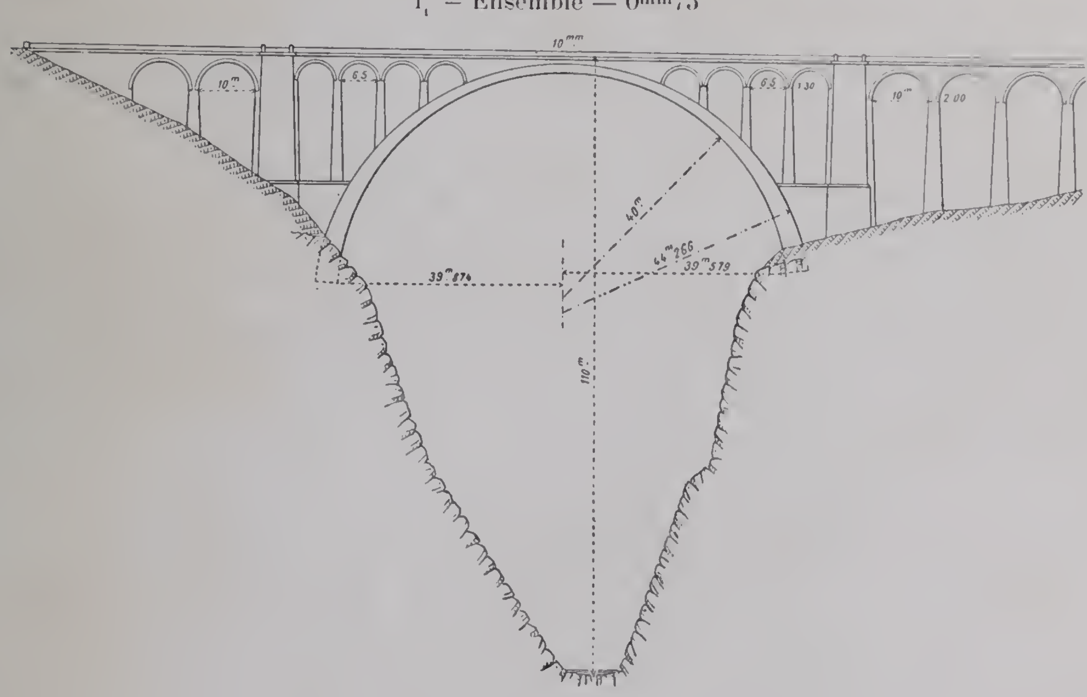
PONT SUR LA ROIZONNE A 6k DE LA MURE *(ISÈRE)* [1]

Ligne électrique à voie de 1m de La Mure à Gap

et Chemin de grande Communication.

1912-1916 **C**[1] fr (⩾ 40m) [2]

f_1 — Ensemble — 0mm75



1. Intrados. — C'est réellement un arc de cercle très peu surbaissé : il diffère très peu d'un plein cintre, je le compte comme tel.

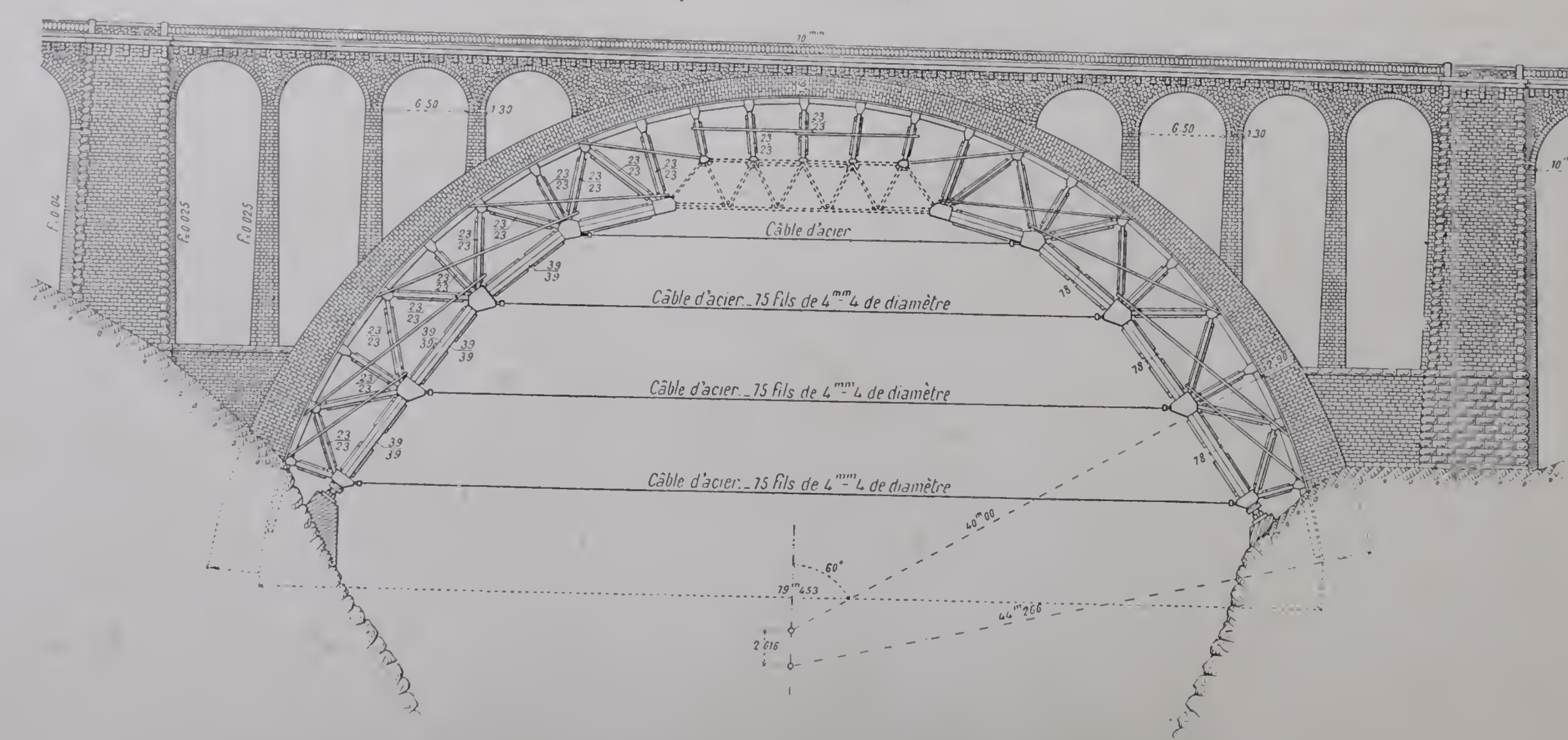
2. Hauteur de la voie au-dessus du thalweg. — 110m [2]

1. — Voir tableau synoptique VI, p. 180.

2. — Il y a 86m à Solis (I, p. 56 f_1), 88m à Wiesen (I, p. 236 f_1).

PONT SUR LA ROIZONNE

f_2 — Grande voûte — 2mm



Φ$_1$ — Octobre 1915



3. Cintre. — C'est le type de Luxembourg,[3] dans lequel l'entrait armé est remplacé par une poutre armée. Il a été calculé par les mêmes méthodes, les mêmes formules, avec les mêmes charges, les mêmes efforts par $\overline{0^m01}^2$.

3. — II, p. 70-74.

Sur chaque rive, on a monté et assemblé les 4 panneaux inférieurs des 4 fermes; le tout a été soulevé et mis en place à l'aide d'un chariot porté par un câble transporteur, puis soutenu en porte à faux par des câbles amarrés aux grandes piles. Les poutres métalliques faisant clef des 4 fermes ont été mises en place l'une après l'autre[1].

Φ_2. — Cintre en montage — Juillet 1914.



Φ_3. — Clavage du 2e rouleau — Déc. 1914.



4. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : M. Rivoire-Vicat, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées.

Direction des Travaux : M. Rivoire-Vicat.
M. Wilhelm, Ingénieur en Chef.
MM. Millot et Genet, Ingénieurs ordinaires.
M. Humbert, Sous-Ingénieur, Chef de Section.

Entrepreneurs : MM. Fayolle et Pascal.

1. — Toute cette opération a été très bien conduite par M. Bonnet, maître charpentier, à Grenoble.

SOURCES :

Dessins et renseignements gracieusement communiqués par M. l'Inspecteur Général Rivoire-Vicat.

VOÛTES INARTICULÉES EN ELLIPSE

PONTS EN DEUX ANNEAUX
A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE E^n E^n r^{te} ($\geqslant 40^m$)

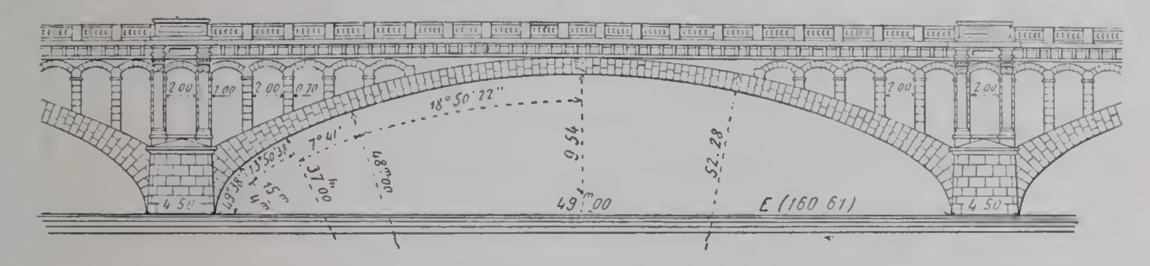
(Voir tableau synoptique I, p. 190 et monographies I, p. 193 à 207)

PONT DE L'HÔTEL-DIEU, SUR LE RHÔNE, A LYON [1]

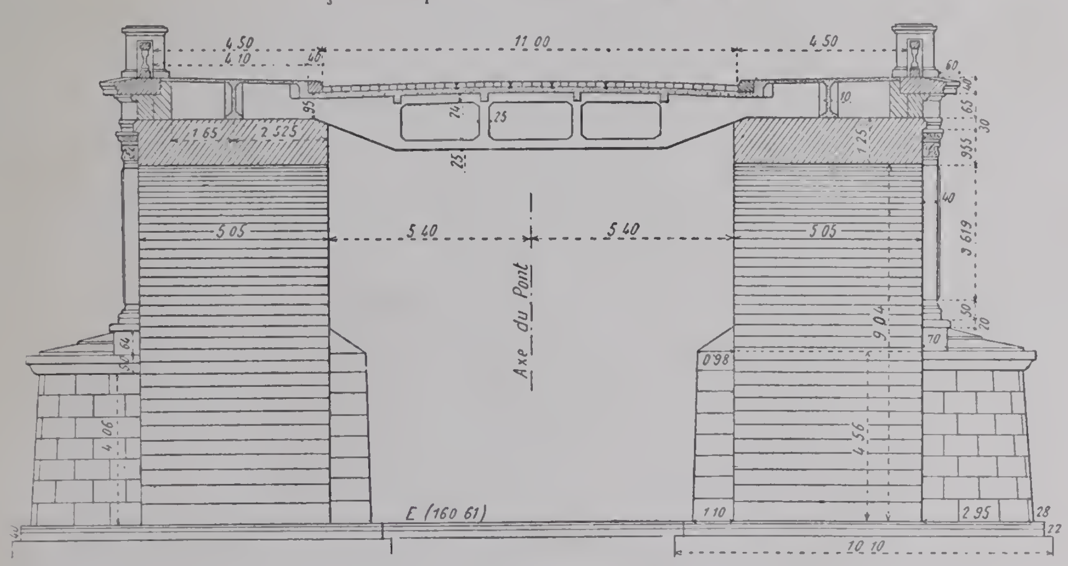
1912-1916 E^n E^n r^{te} ($\geqslant 40^m$)[2]

f_1 — Ensemble — $0^{mm}6$

f_2 — Voûte de 49^m — 2^{mm}



f_3 — Coupe en travers à la clef — 5^{mm}



1. — Voir tableau synoptique VI, p. 182.

Personnel.

Projet: M. Auric, Ingénieur en Chef de la Ville, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées. (Type de pont, dimensions des voûtes).

M. Chalumeau, Ingénieur en Chef de la Ville.

M. Fabrègues, Ingénieur.

Φ_1 — Vue prise de la rive gauche — 9 mars 1916.



Travaux : M. Chalumeau, Ingénieur en Chef, M. Cortot, Ingénieur.

M. Fauton, Conducteur Principal.

Entrepreneurs :

Fondations : M. Joya, de Grenoble.

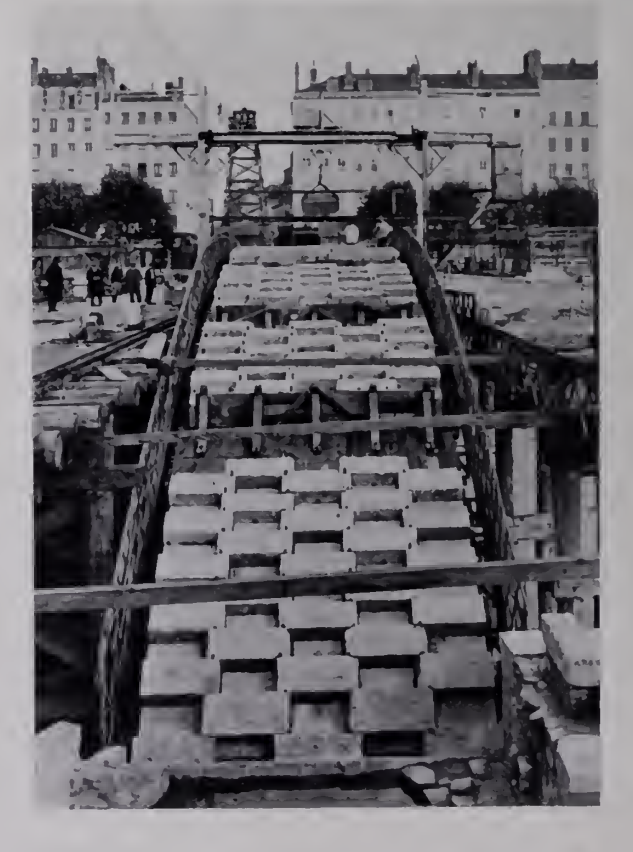
Élévation et dalle en béton armé : MM. Rouchon, Desseauve et Cochet frères, de Lyon.

Fourniture de pierre de taille : M. Sauvain, à Corgoloin.

2. — Voir sur la découpe dans une même assise III, p. 67, art. 5 B — V, p. 18, art. 2.

SOURCES : Dessins, photographies, renseignements, gracieusement communiqués par M. Chalumeau, Ingénieur en Chef de la Ville de Lyon.

Φ_2 — Anneau aval, voûte de 49^m^ — 5 nov. 1914. [2]



PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE E^n F^r (> 40m)

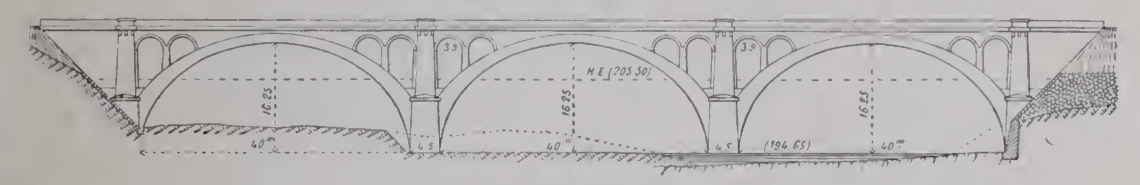
(Voir tableau synoptique I, p. 222 et monographies I, p. 225 à 230)

PONT SUR LE TARN A COURRIS *(TARN)* [1]

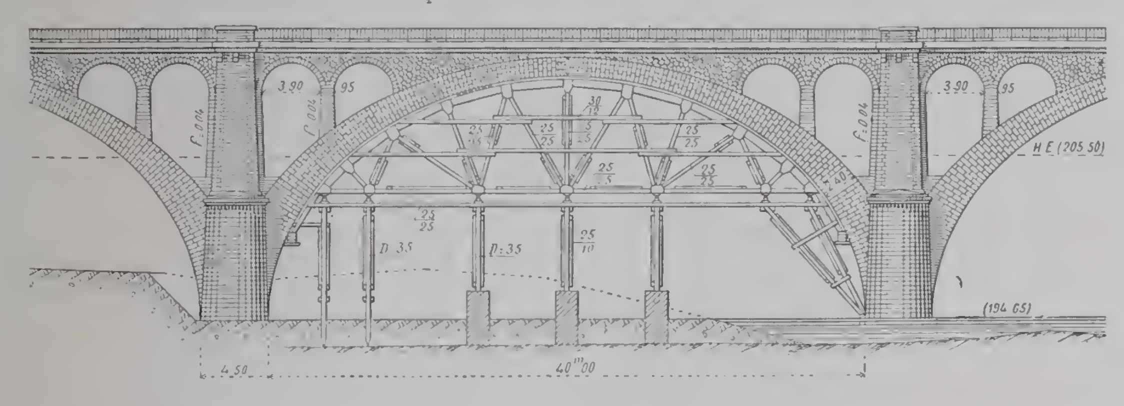
Ligne d'Albi à Saint-Affrique

1912-1916 E^n F^r (> 40m)[2]

f_1 — Ensemble — 0mm9



f_2 — Arche centrale — 2mm



1. Un seul cintre pour les 3 voûtes. — Le Tarn a eu là une crue de 10m85 : pour ne pas l'encombrer, on n'a fait qu'un cintre.

Il est du type Antoinette. [2]

Sur ce cintre, on a d'abord construit le 1er rouleau d'une voûte de rive, (2 assises de moellons). *On a décintré*[3], puis on a transporté le cintre à l'autre rive ; on a, dessus, construit le 1er rouleau de la voûte, puis, celui de la voûte centrale.

1. — Voir tableau synoptique VI, p. 182.

2. — II, Pl. p. 144bis f_{16} — V, p. 139.

3. — En supposant au 1er rouleau 0m875 à la clef, 1m125 au milieu de la montée, la pression maxima avant le clavage du 2e rouleau y est (Methode de M. Resal): 11k à la clef (extrados) — 18k au milieu de la montée (extrados).

Les deuxièmes rouleaux — faute d'approvisionnement — ont été faits longtemps après les premiers, d'abord celui de la voûte centrale, puis les autres.


Φ₄. — 19 octobre 1913.



2. Dates d'exécution du 1er rouleau des 3 voûtes.

	Voûte 3 (1913)	Voûte 1 (1914)	Voûte 2 (centrale) (1914)
Commencement	7 septembre	2 mars	26 juin
Fin	17 octobre	20 avril	30 juillet
Décintrement	23 novembre	20 mai	10 septembre
Soit après	*37 jours*	*30 jours*	*43 jours*

3. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : MM. Jannin et Aroles, Ingénieurs en Chef.

Travaux : M. Aroles, Ingénieur en Chef.

M. Barrère, Ingénieur ordinaire.

Entrepreneurs : MM. Bernard et Jean Fraisse.

SOURCE :

Renseignements gracieusement donnés par M. Barrère, Ingénieur des Ponts et Chaussées à Albi.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC PEU SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr (≥ 40m)

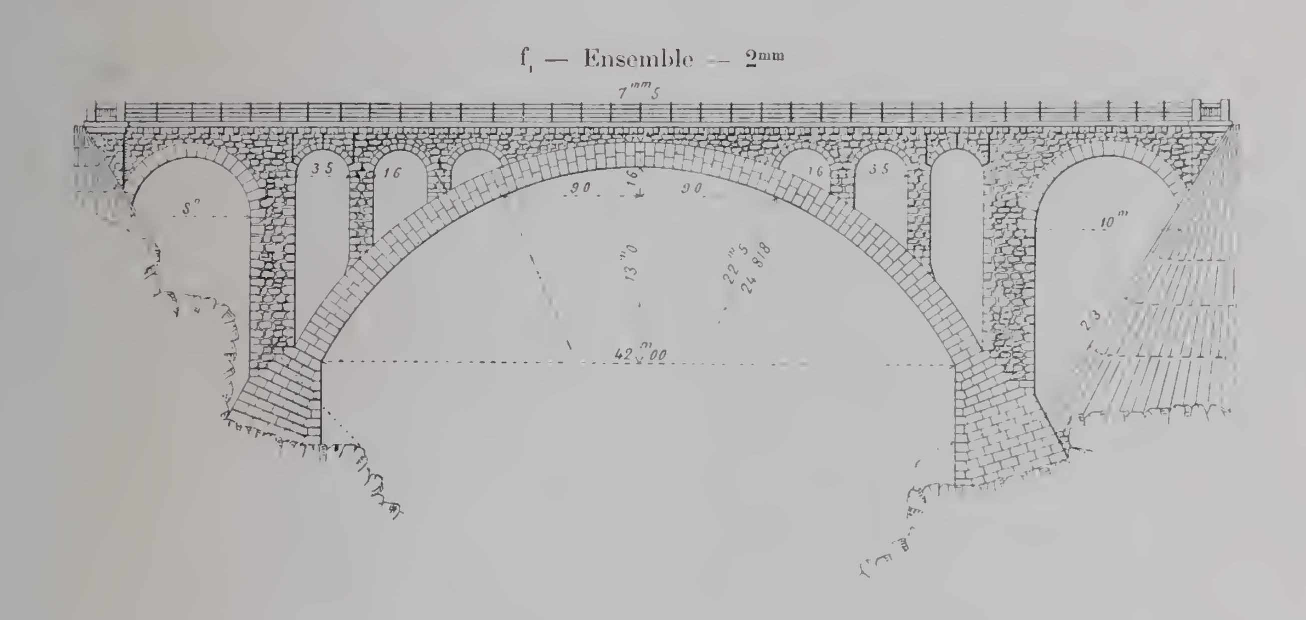
(Voir tableau synoptique II, p. 122 et monographies II, p. 125 à 176)

PONT DE NIAGARA SUR LA RAUMA *(NORVÈGE)*[1]

Ligne de Dombaas à Aandalsnes

1914-19... $\widehat{A}^1$ Fr (≥ 40m)[12]

f₁ — Ensemble — 2mm



1. — Voir tableau synoptique VI, p. 184.

SOURCE :

Dessins d'exécution et renseignements qu'a bien voulu me communiquer, en avril 1916, M. Otto Aubert, Ingénieur en Chef de la Construction des Chemins de fer de l'Etat, à Christiania.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SERIE $\widehat{A}^1$ f^r^ (⩾ 40^m^)

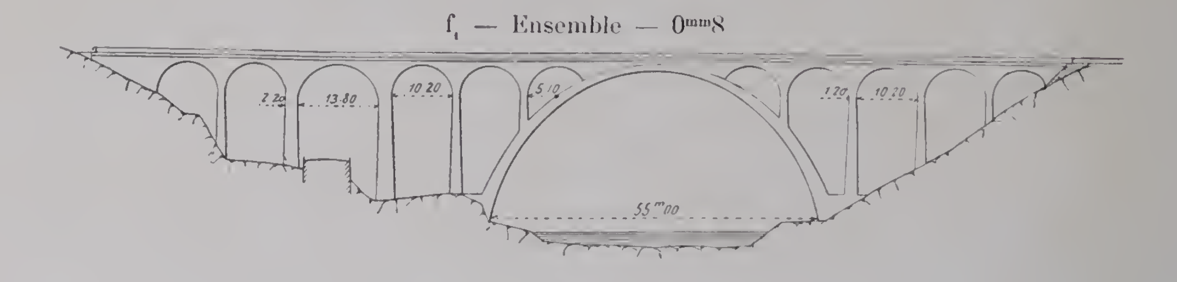
(Voir tableau synoptique II, p. 180 et monographies II, p. 183 à 196)

PONT sur la VOUGA
A POZO près de PECEGUEIRO DO VOUGA *(PORTUGAL)* [1]

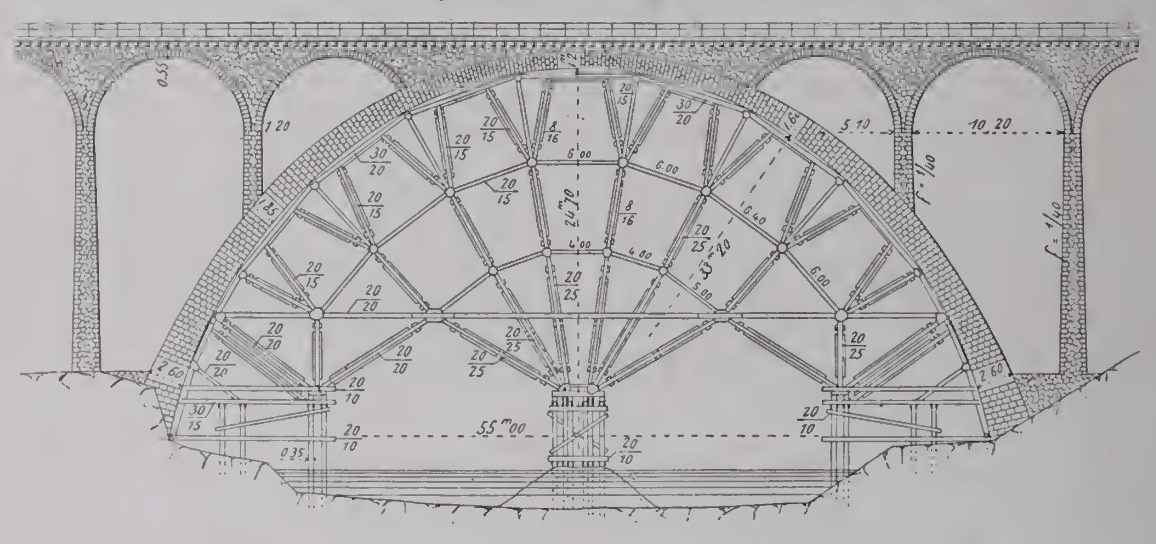
Ligne de Sarnada à Vizeu

Mars-Juillet 1913 — $\widehat{A}^1$ f^r^ (⩾ 40^m^) [5]

f_1 — Ensemble — 0^mm^8



f_2 — Grande voûte — 2^mm^



1. — Voir tableau synoptique VI, p. 184.

SOURCE :

Dessins et renseignements gracieusement communiqués par M. F. Mercier, Entrepreneur à forfait de la ligne de La Vouga.

PONT DE PÉLUSSIN *(LOIRE)* [2]

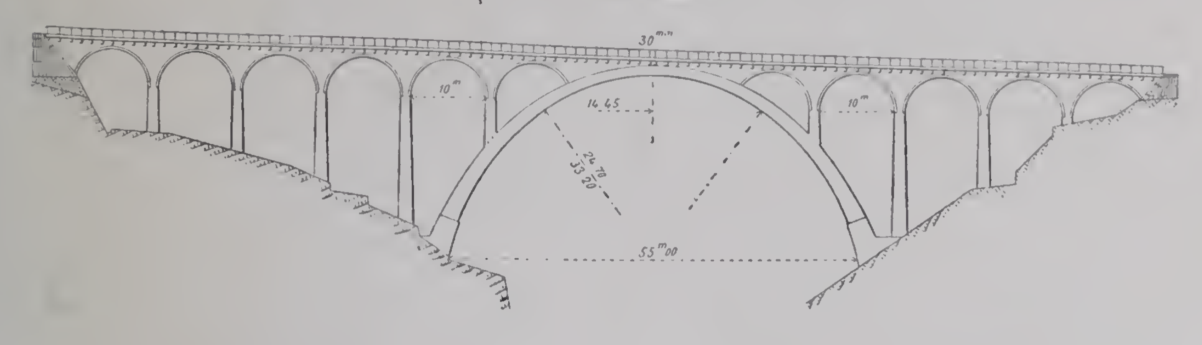
Ligne d'intérêt local de Pélussin à Maclas

Commencé en Juin 1914
Repris en Mai 1915
Terminé en Mars 1916

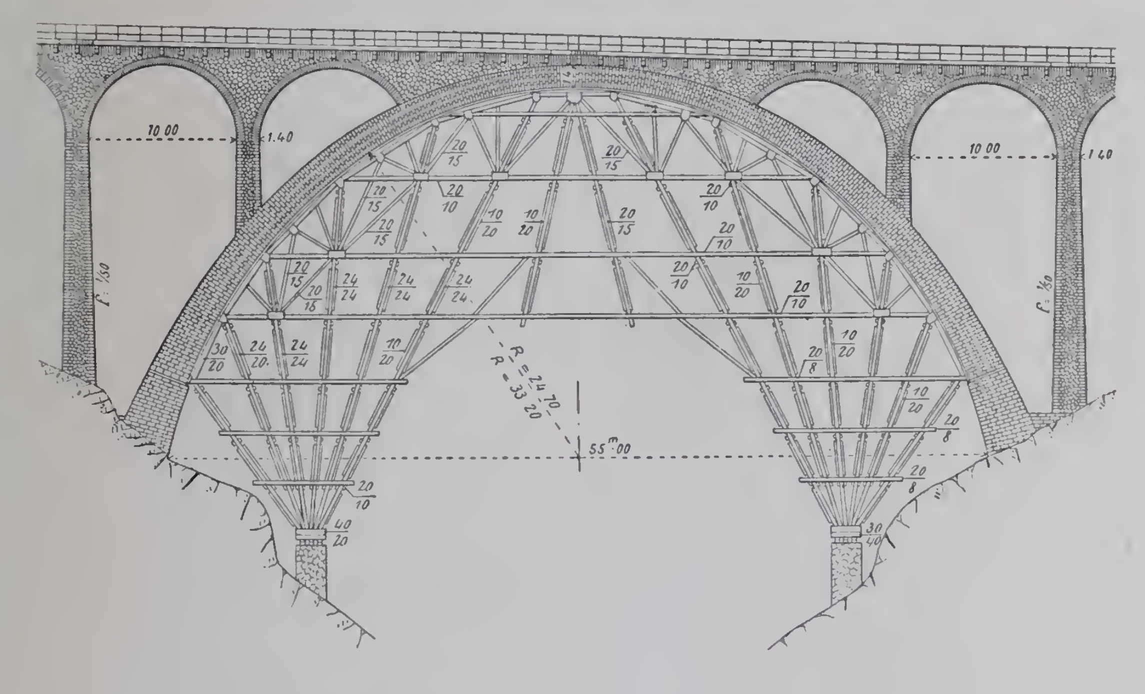
$\widehat{A}^1$ f[r] (⩾ 40[m])[6]

(Voir monographies II, p. 183 à 196)

f_1 — Ensemble — 1[mm]



f_2 — Grande voûte — 2[mm]



2. — Voir tableau synoptique VI, p. 184.

SOURCE :

Dessins et renseignements qu'a bien voulu me donner M. F. Mercier, Président de la Société des Chemins de fer du Centre.

PONTS EN DEUX ANNEAUX A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE[1]

SÉRIE $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r.te (⩾ 40m)

(Voir tableaux synoptiques III, p. 16, II, p. 61 et monographies III, p. 19 à 70, II, p. 67 à 114)

PONT SUR LE LOT A VILLENEUVE *(LOT-ET-GARONNE)*[2]

Route et ligne d'intérêt local de Villeneuve à Villeréal

1914–1916 $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r.te (⩾ 40m)[1]

1. Pont en 2 anneaux. — L'ouvrage est en 2 anneaux de 3m03 de largeur, distants de 4m90, retombant sur 2 culées de 4m perdues dans le terre-plein du quai.

Sur les arcs, s'appuyent des piles en béton armé revêtues de briques, portant le tablier en béton armé, entretoisées le long des tympans par des pleins cintres en béton armé, revêtus de briques.

2. Fibre moyenne et intrados des grandes voûtes. — La fibre moyenne est un funiculaire des charges mortes; rapportée à une tangente au sommet, elle a pour équation :

$$y = 0{,}47619\left(\frac{x}{10}\right)^2\left[1 + 0{,}00681819\left(\frac{x}{10}\right)^2 + 0{,}0000161006\left(\frac{x}{10}\right)^4\right]$$ [3]

Pour une montée de 13m054, sa portée est de 96m86 : son rayon de courbure à la clef est de 105m. [4]

Normalement à cette fibre moyenne, on a porté les 1/2 épaisseurs calculées et on a tracé, au sentiment, l'intrados. A partir de 44m de la clef, c'est un arc de 15m, puis de 5m44 de rayon.

1. — Ponts sous route en 2 anneaux, de 40m de portée et plus :
en ellipse à plusieurs grandes arches, I, p. 188 à 207 — Pont des Amidonniers ;
en arc peu surbaissé, à une seule grande arche, II, p. 60 à 114 — Ponts de Luxembourg p. 67, de Walnut Lane, p. 83 — sur la Rocky River, p. 95 — de Constantine, p. 107.

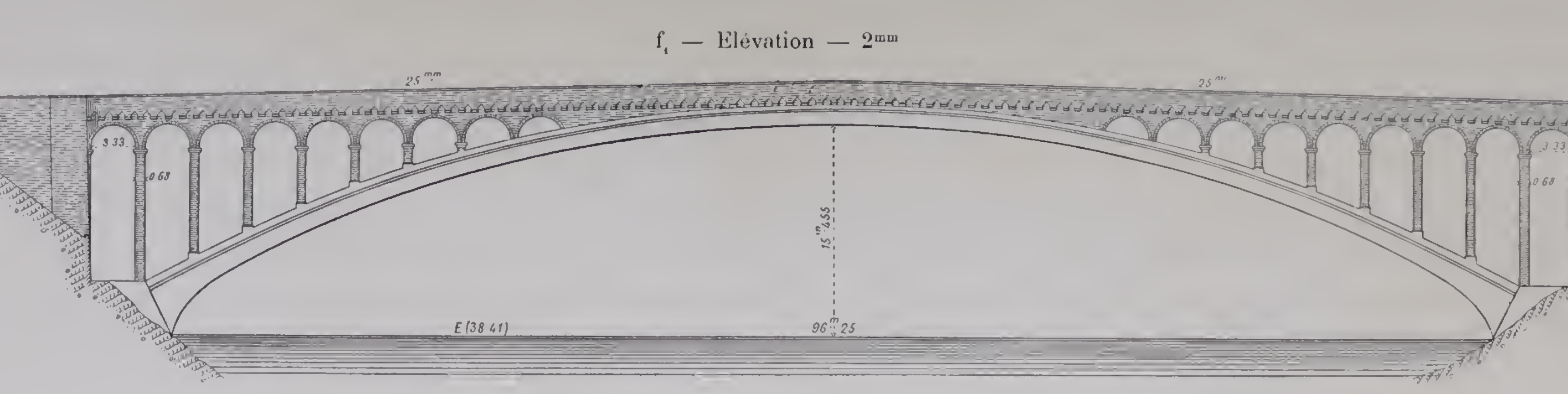
2. — Voir tableau synoptique VI, p. 186.

3. — Elle est à moins de 0m009 de la courbe : $Y = \frac{13{,}054\left[\overline{129}^2 - \overline{48{,}43}^2\right]}{\overline{48{,}43}^2} \times \frac{x^2}{\overline{129}^2 - x^2}$ (III, p. 337, 366).

4. — C'est celui de l'intrados du Pont de Plauen (III, p. 14, 52).

PONT DE VILLENEUVE

f_1 — Élévation — 2mm

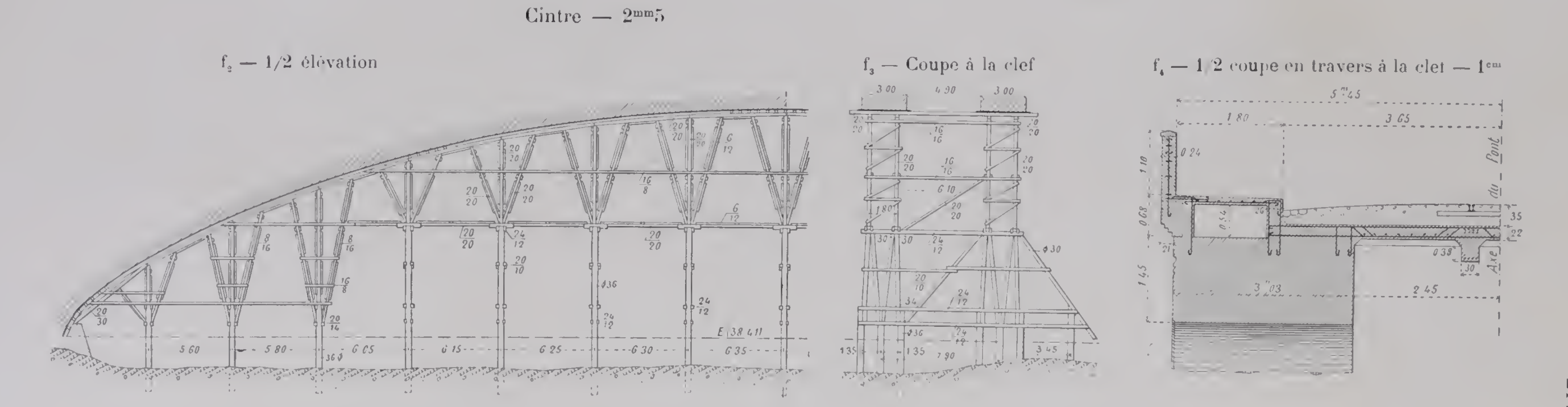


Cintre — 2mm5

f_2 — 1/2 élévation

f_3 — Coupe à la clef

f_4 — 1/2 coupe en travers à la clef — 1cm



3. « Matériau » des grandes voûtes. — Elles sont en béton, au dosage de 350^k de ciment pour 1^{mc} de gravier « tout venant » du Lot. [5, 6, 7]

4. Parapet (Projet). — Le parapet, en briques, de 0^m24 d'épaisseur, sera armé. Il reposera sur une file de corbeaux portant des mitres en briques, comme on en voit à de vieux monuments de Toulouse.

5. — Pour les voûtes en béton, voir V, p. 23 à 28.

6. — Voici les résultats des essais faits à l'École des Ponts et Chaussées, à 90 jours, sur des cubes de 20^c de béton de mêmes éléments (Procès-verbal du 16 juin 1915) :

Poids en kg du ciment pour 1^{mc} en œuvre		200^k	250^k	300^k	350^k	400^k	450^k	500^k	550^k	600^k
Charge par $\overline{0^m01}^2$	1re fissure	171	173	270	411	438	484	550	495	472
	écrasement	185	243	332	457	515	544	626	567	602

7. — Les Compagnies de l'Est et du Nord ont fort judicieusement refait en béton des voûtes ruinées en août et septembre 1914 : elles n'auraient pas eu à temps des moellons.

Voici les ingénieuses dispositions imaginées par M. Descubes, Ingénieur en Chef de la Voie de l'Est :

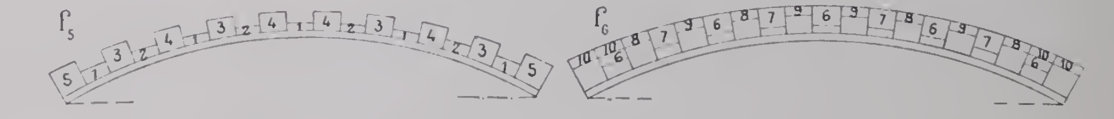
là où les débris des ouvrages encombrent le lit des rivières, il est fort difficile de placer les cintres usuels. On courbe de vieux rails* — mieux des cornières assemblées, plus faciles à courber — on les noie dans 20^c à 25^c de béton.

Ce rouleau-cintre s'appuie sur des retombées bien dressées ; il restera dans la voûte.

Pour un pont sur la Meurthe à Raon-l'Etape, ligne de Lunévillle à Saint-Dié, à 2 arcs de 18^m35 surbaissés à 1/7,46, on a ainsi bétonné (mars-avril 1915) :

à peu près tous les mètres, on pose sur le cintre, normalement à la fibre moyenne, des grillages en fil de fer raidis par des fers ronds ou des cornières : on coule le béton dans 4 alvéoles à la fois, répartis de façon à charger uniformément le rouleau-cintre (lequel est déformable) — alternativement sur le 1/3 et sur les 2/3 de l'épaisseur de la voûte (f_5); on fait de même pour le 2ᵉ rouleau (f_6). Les voussoirs se soudent à travers les mailles des grillages.

Les deux arches ont été bétonnées en deux jours.



La Compagnie du Nord a refait en béton :

les 3 voûtes du pont de Laversine sur l'Oise (ligne de Paris à Creil), 3 voûtes biaises à 50° de 28^m66 de portée biaise, à peu près en plein cintre sur leur section droite, sur cintres retroussés rigides, en 2 rouleaux sans joints vides ; le premier du 1/3 de l'épaisseur, coulé en 48 heures. On a noyé dans le béton 2 quadrillages de fers ronds de 22^{mm} à l'intrados et à l'extrados, réunis par des étriers en barres de 14^{mm} (environ 40 kil. d'acier par m.c de béton). — Dosage du béton, 350 kil. de ciment par m.c (février-avril 1915).

Projet et direction des travaux : M. Candelier, Ingénieur en Chef de la Compagnie du Nord, avec le concours de MM. Babut, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées et Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Entrepreneur : M. F. Mercier, à Moulins.

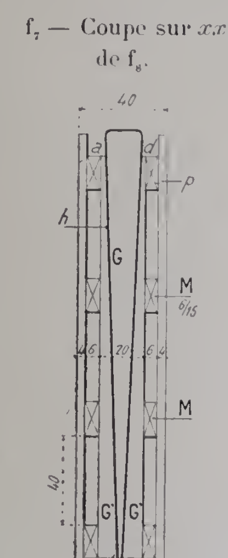
6 arches du viaduc de Poix** (ligne d'Amiens à Rouen) : pleins cintres de 16^m50; les premières ont été construites par tranches en béton à 200 kil., les dernières par rouleaux en béton à 300 kil. (novembre 1914-mai 1915).

Direction : M. Candelier, Ingénieur en Chef de la Compagnie du Nord.
Projet : M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées, en congé.
Entrepreneur : M. Graveron.

* L'idée première du cintre en rails noyés dans la voûte est de M. Valat, Ingénieur Principal de la Compagnie de l'Est.
** VI — p. 64, renvoi 69.

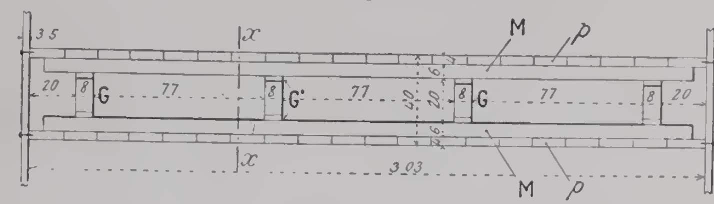
5. **Exécution des grandes voûtes.** — Sur le cintre, le long des bandeaux, on a monté des masques latéraux très solides, sur lesquels on a cloué des liteaux pour dessiner les moulures — puis au droit de chaque appui du cintre, un coffrage réservant un vide de 0m40 (f_7, f_8).

f_7 — Coupe sur *x.x* de f_8.



Coffrage entre 2 tranches (0m03 p. m.)

f_8 — Vue par dessus

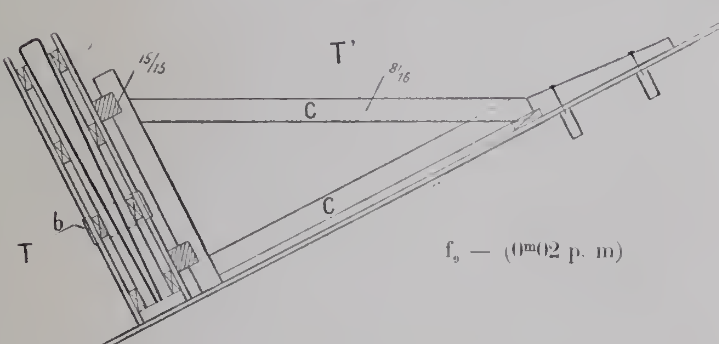


G — Coin en bois entouré d'un feuillard *h* de 6mm, suiffé.

G' — Contre-coin en bois : sur les faces *ab*, *cd*, feuillard de 2mm.

p — Planches de 4cm placées normalement à la douelle.

Pendant qu'on remplissait une tranche T (f_9), le coffrage était tenu par un chevalet amovible CC qu'on enlevait ensuite et qu'on plaçait plus haut pour tenir le coffrage supérieur de la tranche suivante T'.



f_9 — (0m02 p. m)

Les voûtes étaient ainsi divisées en tranches entourées d'une caisse étanche et solide : ces tranches avaient environ 5m60 de long ; elles cubaient de 25 à 40mc. On remplissait une caisse par jour, par couches de 0m20 parallèles à la douelle : le béton était damé par trois pilonneuses à air comprimé ; il était peu mouillé.

Contre les masques de tête, sur 0m20, le béton n'avait pas de cailloux de plus de 3cm ; il était dosé à 600 kg par mètre cube et un peu plus mouillé : on avait ainsi un parement plus compact, résistant mieux aux intempéries.

On a monté les deux arcs des retombées à la clef : on faisait une tranche sur l'un, puis la même tranche sur l'autre.

Pour empêcher une tranche T' de glisser sur le cintre (f_9), on la retenait, au tiers de la hauteur du joint à partir de l'intrados, par des butons *b* en béton fretté de 0m20 de diamètre, qui traversaient le coffrage pour s'appuyer sur la

tranche inférieure T[8] : on les noyait ensuite dans le béton.

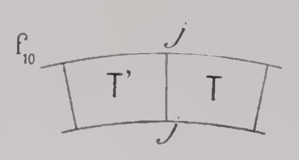
On laissait le béton durcir 48 heures, puis, on « décoffrait », en « décollant » les coins G (f_7) : on réemployait les bois aux joints suivants.

Pendant l'exécution d'une tranche, l'appui en arrière tassait d'environ 2^{cm} : moins, pendant celle de la tranche suivante. Dans un cintre à poteaux et contre-fiches, les déformations d'un appui sont indépendantes de la charge sur les autres[9].

Toutes les tranches faites, on a rempli les vides entre elles avec le même béton bien pilonné.

6. Décintrement. — On a décintré, par un procédé fort ingénieux, inventé par l'auteur du projet M. Freyssinet, et éprouvé par lui à des arcs en béton armé[10].

Au lieu d'abaisser le cintre sous les voûtes, on soulève les voûtes au-dessus du cintre, en écartant l'une de l'autre les demi-voûtes de part et d'autre de la clef par des vérins hydrauliques assez puissants pour y produire un effort égal à la poussée qui serait créée par le décintrement[11].



Supposons exécutée la dernière tranche T' de la demi-voûte de gauche (f_{10}) : on enlève le coffrage qui maintenait le joint de clef *jj*, on graisse ce joint pour que le béton de T n'y adhère pas, et, contre lui, on exécute la tranche T. L'arc est ainsi coupé à la clef par un joint *jj* sans épaisseur.

8. — Voir ce qui a été fait pour retenir les tranches au pont de Walnut Lane II, p. 90.

9. — V, p. 135, 137.

10. — Arc à deux articulations (portée 50^m, montée 2^m) que M. F. Mercier, Entrepreneur, a fait construire à Moulins en 1908, à titre d'expérience : on l'a décintré en y enfonçant des coins à la clef.

Ponts en béton armé sur l'Allier : du Veurdre 1910 (3 arcs de 72^m56 et 67^m surbaissés au 1/15, (1910) — de Boutiron, (1912). Entrepreneur à forfait M. F. Mercier.

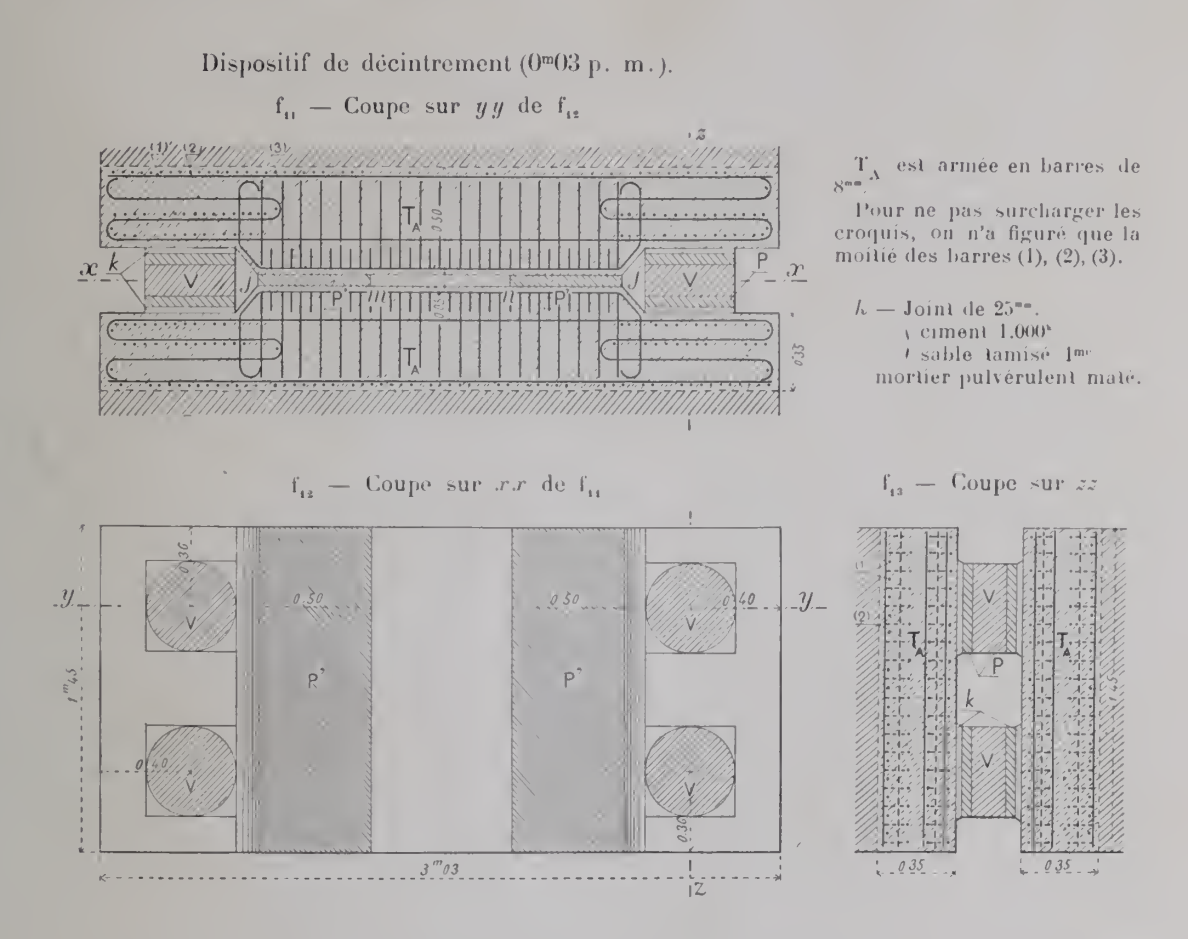
11. — Dans un mémoire inséré aux Annales des Ponts et Chaussées d'octobre 1881, p. 472, j'indiquais que le système des clavages multiples matés « crée entre les voussoirs des clavages des réactions *qui soulagent le cintre et préparent le décintrement.* »

Dans son rapport du 20 juin 1913 sur les projets présentés pour le pont de Villeneuve, M. l'Ingénieur en Chef Bory fait cette observation :

« Il convient de remarquer ici que le système de décintrement très particulier qui sera employé au « pont de Villeneuve n'est que l'application systématique de ce dernier principe.

« On crée à la clef des réactions, non par le clavage et le matage du joint, mais par l'action de vérins « hydrauliques. Le principe reste le même et les moyens sont différents. »

Dans des vides ménagés à la clef à chaque tête, on a placé quatre vérins V capables chacun de 500^T (f_{11}, f_{12}, f_{13}) : ils pressaient par des plaques d'acier P de 5^c d'épaisseur des tranches T_A en mortier à 1.000 kg de ciment par mètre cube, tenu par une armature à mailles serrées.



Sous une pression de 260^T par vérin[12], le joint vide *jj* (f_{10}, f_{11}) s'est ouvert de 2^c environ sans soulèvement au-dessus du cintre, puis, la pression atteignant 270^T, de 8^c à l'extrados, de 7^c à l'intrados, avec un soulèvement d'environ 9^c au-dessus du cintre.

Dans le joint ainsi ouvert, on a introduit deux plaques en mortier P' (f_{11}, f_{12}) armées d'un quadrillage à mailles serrées, de 5^c d'épaisseur à faces parallèles, garnies sur chaque face d'un enduit frais de pâte de ciment pur de 3^{mm}.

On a laissé échapper l'eau des vérins. Le joint ouvert s'est refermé sur les plaques P' : l'écartement de ses faces est devenu uniforme et égal à 53^{mm}, le soulèvement au-dessus du cintre était réduit à 5^c. Entre les 2 plaques P' (c'est-à-dire en *mn* de f_{11}), on a maté du mortier pulvérulent de ciment.

12. — Soit 1.040^T pour les 4. La poussée calculée de l'arc nu était 1.035^T, soit 24 k. $\overline{0^m01}^2$.

Cet allongement artificiel de 53mm de la fibre moyenne primitive compense :

1° le raccourcissement par compression de l'arc, sous son poids ;

2° le recul des appuis ;

3° le retrait, réalisé avant le décintrement ou à prévoir après.

Les cales P' introduites à la clef, en supprimant les couples de flexion dus aux raccourcissements, réduisent et égalisent les efforts maxima.

Malgré la précision des mesures, on n'a pu constater de déplacement latéral dû au flambement.

Par contre, en refermant le joint de clef sur des cales d'épaisseur inégale, on a provoqué des déplacements latéraux : on les a fait ensuite disparaître, en refermant sur des cales d'égale épaisseur.

Φ_1. — Février 1916. [13]



7. Dates d'éxécution.

1914, février-mars : on commence les travaux, — au moment de la guerre, on a fait la fouille de la culée gauche, on commence à monter le cintre ; — octobre : la culée gauche est fondée, le cintre presque monté.

1915, janvier : on suspend les travaux ; — juillet : on les reprend, on répare les dégâts causés au cintre par les crues ; on pose le platelage et les coffrages ; on fonde la culée droite — 1er septembre : on pose la première tranche ; — 28 octobre : on pose la dernière ; — 29 octobre - 5 novembre : on clave ; — 6 décembre : décintrement.

13. — Photographie qu'a bien voulu nous adresser M. Mercier.

8. Personnel.

Projet et entreprise.

On avait ouvert un concours « entre les constructeurs spécialistes de béton armé, préalablement agréés ».

On a adopté les propositions de MM. F. Mercier et Cl. Limousin (forfait de 430.000 fr.).

Le projet a été dressé par leur bureau d'études sous la direction de M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées, en congé, qui en a imaginé toutes les dispositions.

Examen des projets et contrôle :

M. Bory, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, à Agen.
M. Boulzaguet, Ingénieur à Villeneuve.

9. Ce qu'enseigne le pont de Villeneuve. — Comme portée, les 2 voûtes de Villeneuve (96m25) qui sont en béton, dépassent la plus grande voûte actuelle en maçonnerie, celle de Plauen qui a 90m [14] : ce sont aujourd'hui les plus grandes du monde [15,16].

La largeur à la clef y a été réduite à 3m03, soit environ le 1/32 de la portée, sans flambement.

On les a construites sur cintre à poteaux et contrefiches.

On les a décintrées sans appareil de décintrement sur le cintre, en les comprimant à la clef par des vérins et maintenant ensuite par une cale en béton armé le joint ouvert par les vérins.

14. — III p. 14, 52.

15. — Au tome V. p. 207 renvoi 13, on a fait connaitre qu'on venait de commencer les fondations de la voûte en béton du Bernand de 173m de portée ; à cause de la guerre, on a dû y renoncer.

16. — Pour le classement des voûtes de 40m et plus, voir V. p. 200 à 206.

SOURCE :

Dessins et renseignements gracieusement communiqués par M. Freyssinet.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)

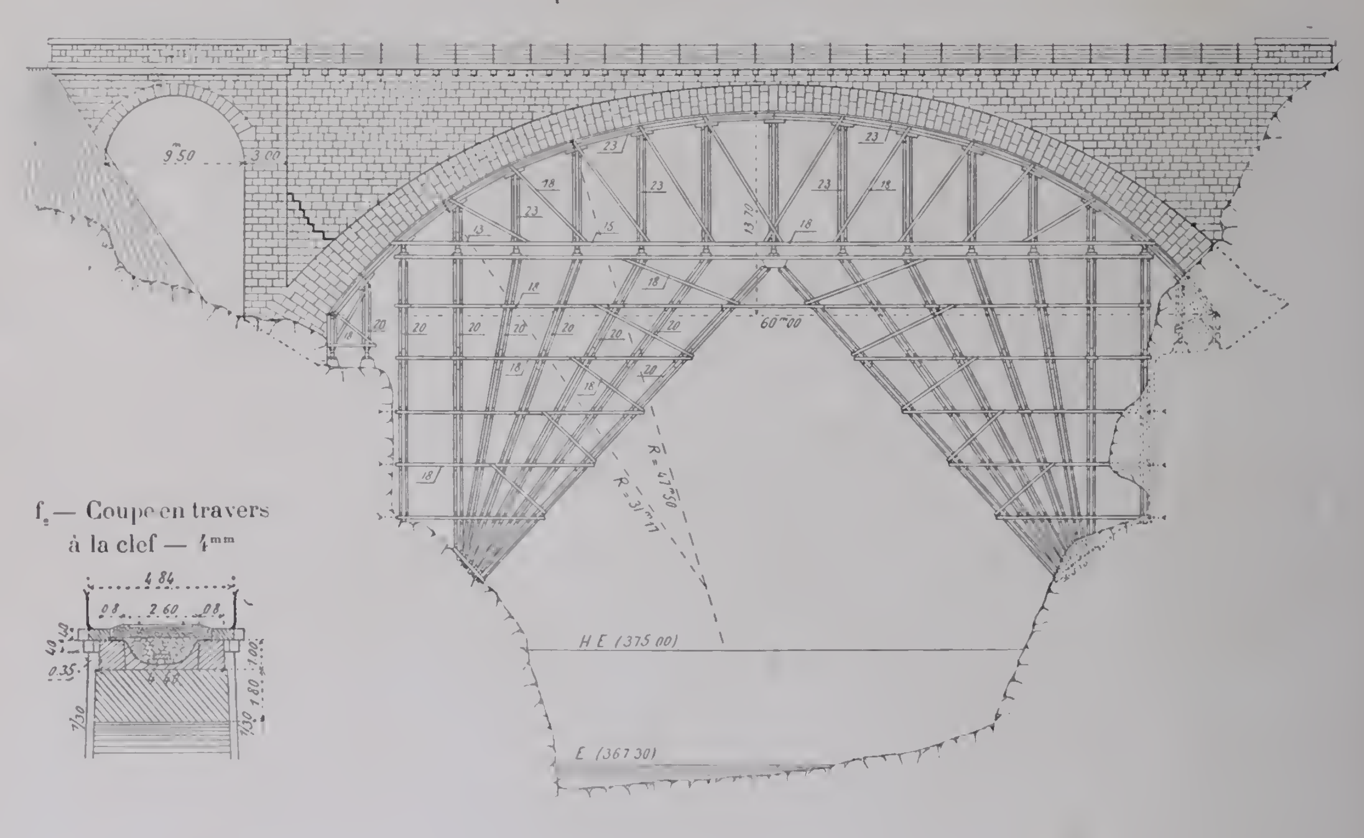
(Voir tableau synoptique III, p. 90 et monographies III, p. 93 à 168).

PONT SUR L'ORKLA, A ORKLA *(NORVÈGE Drontheim)* [1]

Ligne d'Orkla à Stören

1912-1915 $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) [26]

f_1 — Élévation — 2mm



1. — Voir tableau synoptique VI, p. 186.

SOURCE :

Dessins d'exécution et renseignements qu'a bien voulu me communiquer, en avril 1916, M. Otto Aubert, Ingénieur en Chef de la Construction des Chemins de fer de l'Etat, à Christiania.

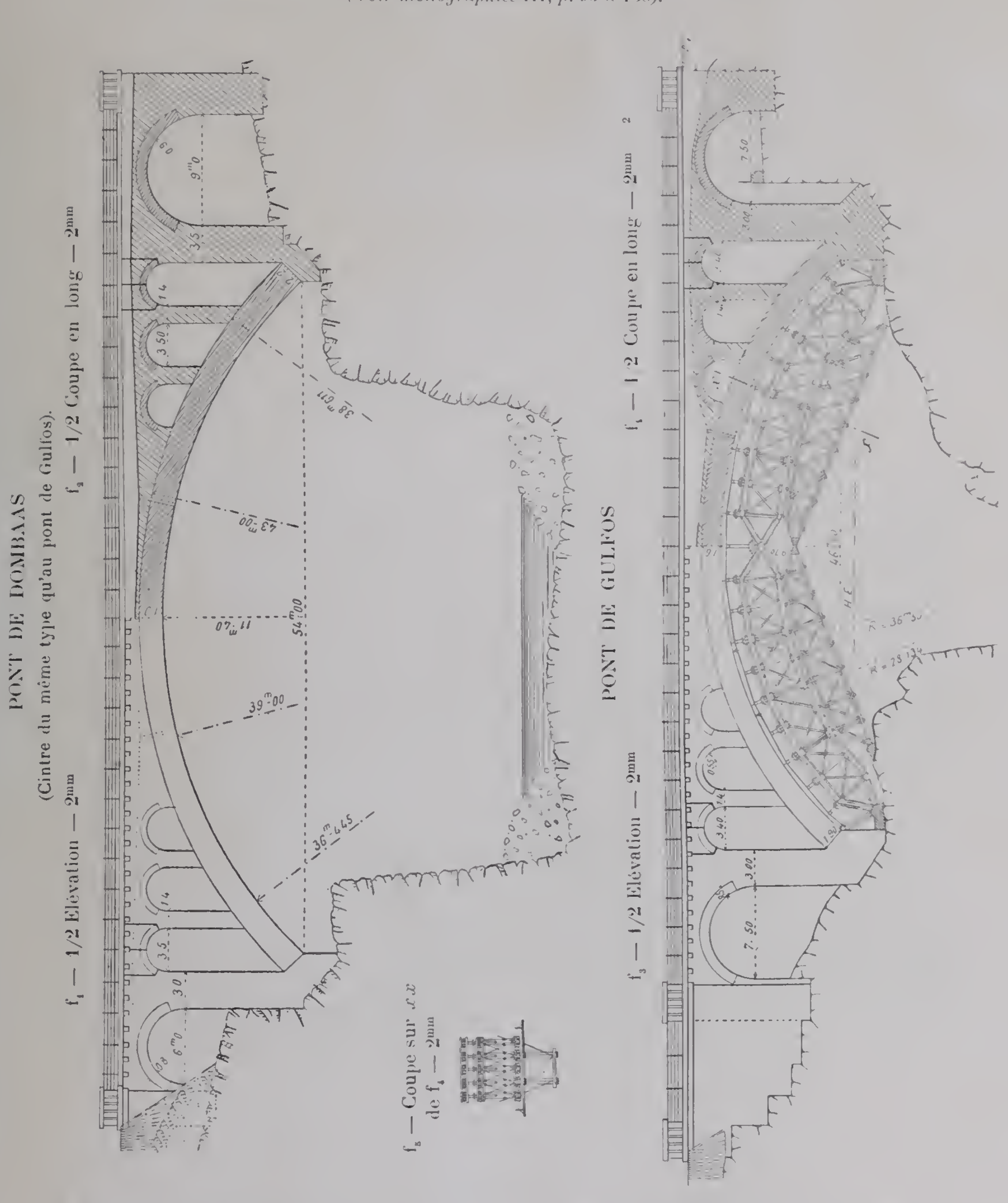
2 PONTS EN NORVÈGE :

SUR LA JORA, A **DOMBAAS,** [1] *ligne de Dombaas à Aandalsnes;*

DE **GULFOS,** [1] *ligne de Trondhjem à Stören.*

1913-19.. $\widehat{A}^1$ F^r ($\geq 40^m$)^{27}. $\widehat{A}^1$ F^r ($\geq 40^m$)^{28}

(Voir monographies III, p. 93 à 168).



1. — Voir tableau synoptique VI, p. 186.

2. — Voir le cintre de Svenkerud III, p. 151.

SOURCE :

Dessins d'exécution et renseignements qu'a bien voulu me communiquer, en avril 1916, M. Otto Aubert, Ingénieur en Chef de la Construction des Chemins de fer de l'État, à Christiania.

VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40m EN BÉTON PEU ARMÉ [1]

(Voir tableau synoptique III, p. 286 et monographies III, p. 289)

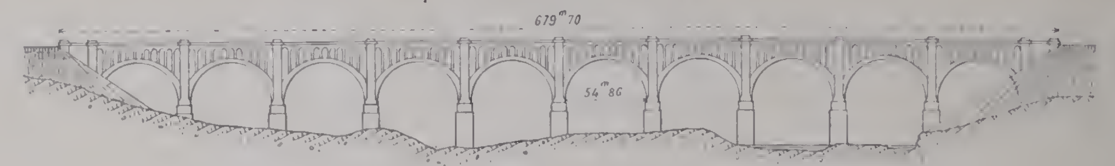
PONT SUR LE TUNKHANNOCK CREEK

PRÈS DE NICHOLSON *(ÉTATS-UNIS Pennsylvanie)* [2]

Ligne de Scranton (Pennsylvanie) à Elmira (New-York)
(Delaware, Lackawanna and Western RR)

1912–1915

f_1 — Ensemble — 0mm2



1. Importance de l'ouvrage. — 10 arches en plein cintre [3] de 54m86 [4] à 73m au-dessus de l'eau, — 679m70 de longueur; quelques piles fondées à 30m dans le sol — environ 125.000mc de béton, 1000t d'acier pour l'armer, 33.000mc de déblai en fondation. C'est un des plus grands ouvrages en maçonnerie [5].

Φ_1 — 1915.



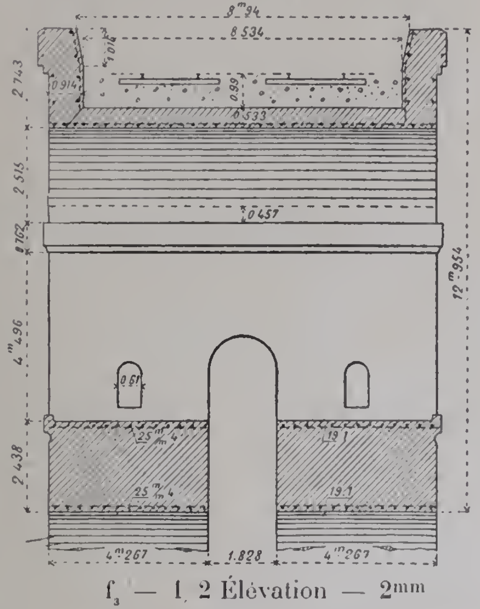
1. — Pour les grandes voûtes en béton peu armé, voir III, p. 284 à 303.

2. — Voir tableau synoptique VI, p. 188.

3. — Voir la Série Ce F' (⩾ 40m) Tome I, p. 76 à 82.

4. — Pour les voûtes complètes — pleins cintres ou ellipses — il semble qu'on se veuille limiter à 55m : le plus grand plein cintre (Ballochmyle, I, p. 38, 41) a 55m17 ; les plus grandes ellipses surbaissées (Annibal, I, p. 88, 112 — Diable, I, p. 88, 116), la plus grande ellipse surhaussée (Wiesen, I, p. 232, 235) ont 55m.

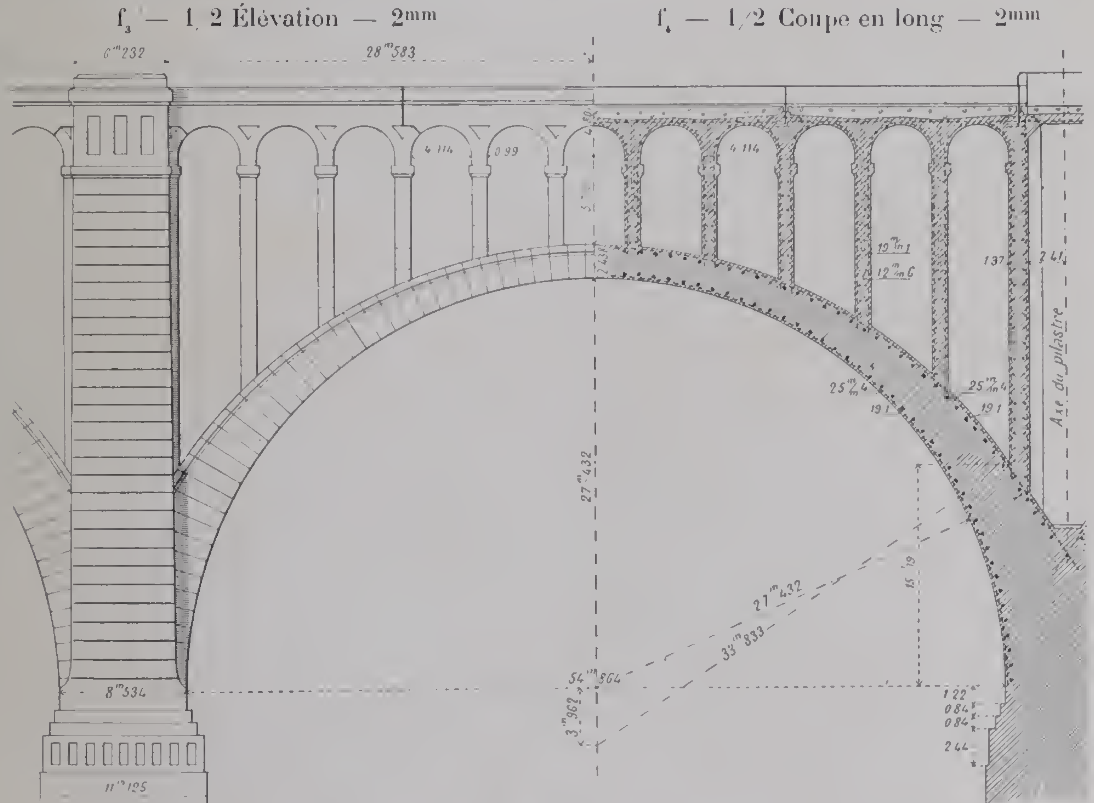
5. — « The largest of its kind in the World » (S, p. 484).



f_2 — Coupe à la clef d'une grande voûte - 5mm

2. Voûtes en 2 anneaux (V. p. 67) f_2. — Type Luxembourg appliqué aux États-Unis aux ponts de Walnut Lane[6], Rocky River[7], Spokane[8]. On n'avait encore fait ainsi que des arcs sous route : ici, ce sont deux ponts accolés en plein cintre, dont chacun porte une voie[9].

3. Voûtes en béton. — Après de longues estimations comparatives, on a adopté le béton de préférence à l'acier, moins cher à entretenir, plus durable, résistant mieux à une augmentation de surcharge, à un déraillement, plus



f_3 — 1/2 Élévation — 2mm

f_4 — 1/2 Coupe en long — 2mm

6. — II, p. 83. 7. — II, p. 95. 8. — III, p. 281, 293.

9. — On achève un viaduc en béton, sous route, long de 526m, large de 23m25, sur le Big Creek à Cleveland (Ohio). Il a 10 arches principales, dont 6 de 39m014 de portée, 13m106 de montée, en anse de panier (arc avec raccordement vertical aux naissances); chaque arche est en 4 anneaux parallèles en béton ; ils ont 1m10 à la clef, 1m83 aux naissances; les anneaux de têtes sont larges de 1m829, les 2 autres de 2m131. Le vide entre les anneaux est de 3m505 aux têtes, de 2m743 au milieu. Les piles et le tablier sont armés. Les tympans sont élégis par de petits pleins cintres : celui qui est au-dessus d'une pile est coupé à la clef par un joint de dilatation. Comme il fallait maintenir la circulation sur un viaduc métallique qui coupe le nouveau, on a construit le nouveau par deux moitiés longitudinales : cintres d'acier, fermes à 3 articulations ; on construisait à la fois deux anneaux de 6 arches consécutives. En 7 à 8 jours on bétonnait une paire d'anneaux. On arriva à couler, à une arche de 39m, 215mc de béton en 1 jour — à une pile, 112mc de béton en 9 heures.
(Engineering News — 9 septembre 1915 — Fast Concreting on Brooklyn-Brighton Viaduct — Cleveland).
Génie Civil 15 janvier 1916.

vite fait quand les usines sont débordées de commandes (S_1 p. 482).[10, 11]

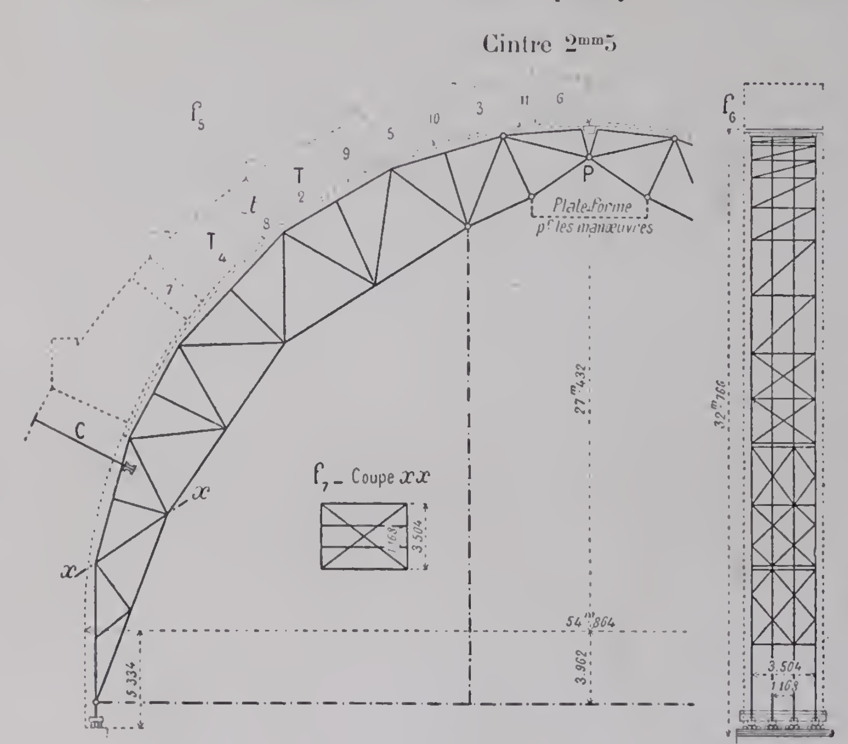
La courbe de pression s'écarte peu de la fibre moyenne.

Les voûtes sont légèrement armées en long et en travers près de l'intrados et de l'extrados pour résister aux efforts dus aux changements de température ; on a fait ainsi aux ponts sur la Delaware[12], de Spokane[8].

4. Fondations des piles centrales. — On descendait un caisson sans fond de 13m × 15m, dont les parois étaient faites de palplanches d'acier de 0m30 de largeur, 9m15 de longueur. On les battait, on creusait — puis on achevait de les enfoncer.

Ensuite, à 1m45 extérieurement à ce premier caisson, on en battait un second. Quand ses palplanches étaient enfoncées de 3 ou 4m, on déblayait à la main entre les deux, on enfonçait les palplanches du caisson intérieur — puis celles du caisson extérieur.

5. Pose du béton des piles en élévation. — Le béton (ciment 1 — sable 3 — cailloux de 5cm, 5) était posé jour et nuit sans arrêt, par couches de 1m20, dans des panneaux en bois de 5m40 de hauteur reliés par des tirants au béton mis en place. Par le froid, on faisait le béton à l'eau chaude, on réchauffait à la vapeur le sable et les cailloux.



On a noyé dans le béton environ 11 °/o de grosses pierres, surtout à la surface des couches successives de 1m20.

6. Béton des grandes voûtes — Cintres. — Jusqu'à 10m au-dessus des naissances, le béton était posé dans des formes en bois, en encorbellement de 2m13 sur les naissances, au delà, sur des fermes d'acier articulées aux naissances et au cerveau (f_5) [13, 14].

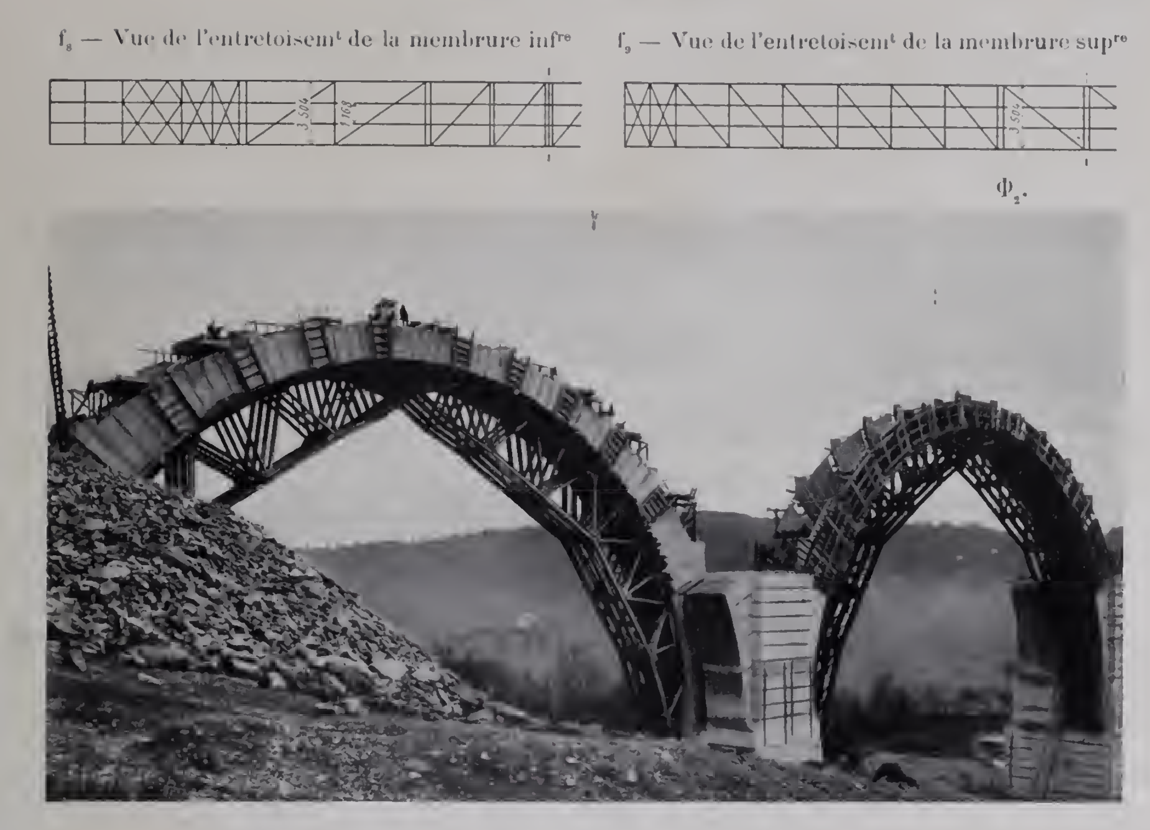
10. — V, Titre I, p. 189 à 198.

11. — Pour les voûtes en béton, voir Tome V, p. 23 à 28.

12. — III, p. 284, 289.

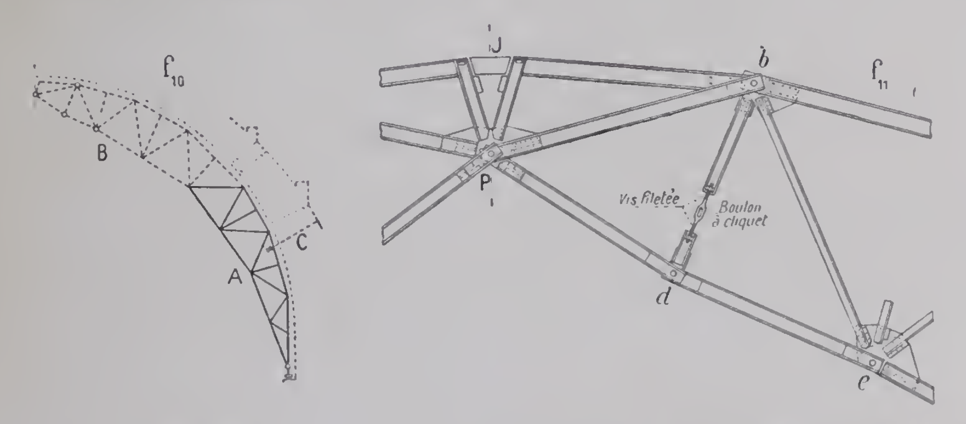
13. — Sur les cintres métalliques, voir V, p. 151.

14. — Comme aux ponts de Rocky River (II, p. 101), de la Delaware (III, p. 291).



Chaque demi-ferme porte 286^T et pèse 24^T5.

On montait d'abord la retombée A (f_{10}) en la soutenant par deux barres filetées C, de 40^{mm}, prises dans le béton. En agissant sur l'écrou de C, on mettait en place la retombée A, puis, dessus, on attachait B.



Le dernier panneau Pebd (f_{11}) est articulé à ses 4 sommets : la longueur bd de sa diagonale est réglée par une tige filetée, laquelle permet de mettre à sa place le cerveau du cintre pour faire la voûte, et de l'abaisser pour décintrer[15]. En J, au-dessus de l'articulation P, un coin en chêne fixe le cintre. A la clef et au 1/4 de la hauteur, étaient attachés des haubans fixés au sol.

15. — Voir III, p. 291.

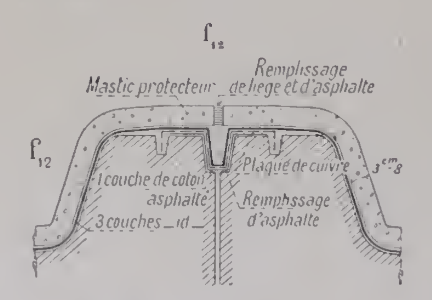
Les voûtes ont été exécutées par tranches T séparées par des intervalles *t* clavés plus tard : f_5 indique l'ordre de pose des T et des *t*. On posait les clefs *t* assez longtemps (7 jours au moins) après les T pour que le béton des T eût fait son retrait (S_2'').

Le montage des cintres fut commencé le 23 septembre 1913 : le cintre de la première voûte, pesant 200^T, fut levé en 8 jours.

Le cintre était ripé d'un anneau sous l'autre d'une même arche, sur 6 rouleaux de 15^{cm} roulant sur un chemin de 10^m82 de longueur, porté par des poutres en **I** de 0^m20.

On faisait avec 5 cintres 5 anneaux consécutifs — puis on les déplaçait transversalement de 6^m et on faisait les 5 anneaux jumeaux — alors on les démontait, on les transportait à l'aide des 2 transporteurs à câbles[16].

7. Chape. — 3 feuilles de coton asphalté, puis 2 couches de 19^{mm} de mastic d'asphalte (S_2'').



8. Joints de dilatation coupant les arches d'évidement. — 4 par grande voûte : 2 près des piles, 2 vers le 1/4 de la portée. Le croquis f_{12} indique comment le joint était protégé pendant qu'on faisait la chape, et comment est assurée la continuité de la chape quand le joint s'ouvre.

9. Personnel.

Ingénieurs :

Section technique de la Delaware Lackawanna and Western Railroad C^y.

MM. G. J. Ray, Ingénieur en Chef.

F. L. Wheaton, Ingénieur de la construction de la ligne de Martin's Creek.

A. B. Cohen, Ingénieur, chargé du bétonnage.

C. W. Simpson, Ingénieur attaché au viaduc.

Entrepreneurs :

Société Flickwir et Bush.

Directeur : M. Frank M. Talbot.

Administrateur : M. C. W. Ritner.

16. — Ces transporteurs avaient un appui au milieu; leur portée était ainsi réduite à 460^m : chaque câble porteur avait 57^{mm}, portait couramment 7^T et jusqu'à 10^T. Grâce à l'outillage, on n'employa à ce grand ouvrage que 225 hommes.

SOURCES :

S_1. — Engineering Record. 3 mai 1913, p. 482 et 484 — 29 novembre 1913. p. 594 — 10 juillet 1915, p. 42.

S_2. — Dessins S_2', renseignements S_2'' et photographies S_2''' gracieusement communiqués par M. G. J. Ray, Ingénieur en Chef de la Delaware, Lackawanna and Western R. R. C^y, à Hoboken (N. J.).

VOÛTES ARTICULÉES — ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\overline{\text{A}}^{n}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)

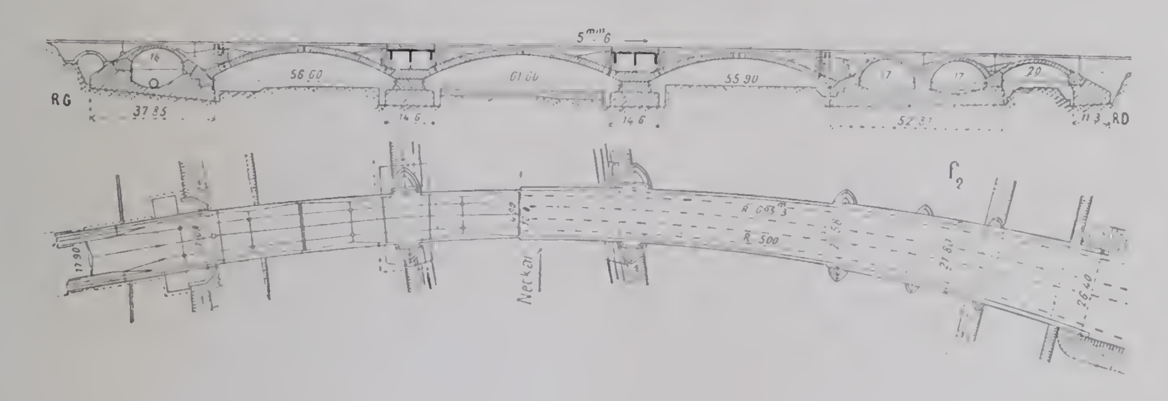
(Voir pour les $\overline{\text{A}}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$) tableau synoptique IV, p. 172 et monographies IV, p. 175 à 208)

PONT A 4 VOIES SUR LE NECKAR, A CANNSTATT *(WURTEMBERG)*[1]

Lignes de Ludwigsburg-Stuttgart et Stuttgart-Plochingen

1911-1914 $\overline{\text{A}}^{n}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)[1]

f_1 — Ensemble — $0^{mm}44$



1. Tracé des têtes. — Le pont porte 4 voies en courbe : elles ne sont pas parallèles ; celle de droite a un rayon de 500^{m}.

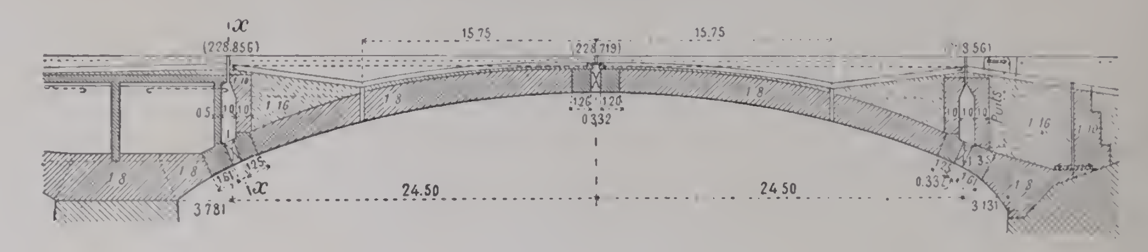
Les têtes sont ainsi tracées :

Côté concave. — Bandeaux suivant un cylindre vertical de rayon un peu moindre que le parapet : tympan en fruit variant de 0 à la clef à 1/24 aux retombées.

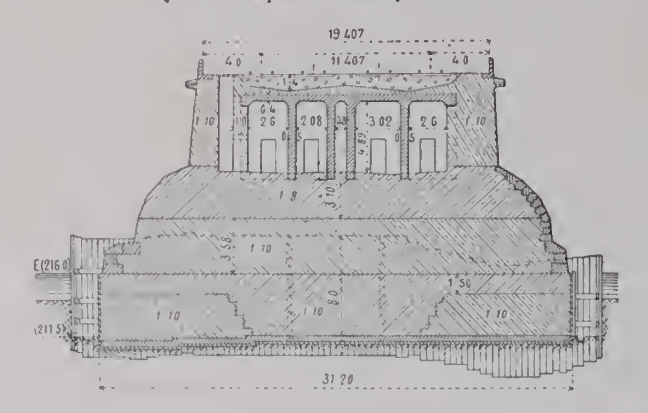
Côté convexe. — Courbes d'intrados de chaque voûte dans des plans verticaux se coupant sur l'axe des piles : bandeaux en fruit augmentant de 0 à la clef à 1/10,6 aux retombées.

1. — Voir tableau synoptique VI, p. 190.

f_3 — Coupe en long de l'arche rive droite — 2^{mm}

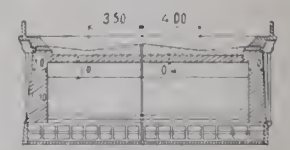


f_4 — Coupe sur une pile — 2^{mm}



f_5 — Coupe sur xx de f_3

2^{mm}



2. Efforts par $\overline{0^m01}^2$ dans la voûte centrale

(Côté concave)

		Retombée R. G.		1/4 de la portée R. G.		Clef	
		Intrados	Extrados	Intrados	Extrados	Intrados	Extrados
Sous le poids propre		+ 36k3	+ 19k9	+ 30k9	+ 20k1	+ 40k3	+ 21k1
Sous la surcharge	Effort maximum.	+ 8.8	+ 4.9	+ 18.2	+ 24	+ 10.3	+ 5.4
	— minimum..			— 14.2	— 14.4		
Ensemble	Effort maximum.	+ 45.1	+ 24.8	+ 49.1	+ 44.1	+ **50.6**	+ 26.5
	— minimum..	»	»	+ 16.7	+ 5.7	»	»

3. Matériaux. — L'avant-bec des piles est revêtu de pierres pour résister aux glaces et aux crues : le reste est en béton [2].

Voici, pour les différentes parties du pont, les dosages prescrits, le travail permis, la résistance exigée.

		Dosage pour 1 vol. de ciment				Travail permis	Résistance exigée à 28 jours	
		Sable	Gravier	Pierre cassée	Ensemble	kg / $\overline{0^m01}^2$	kg / $\overline{0^m01}^2$	
Béton de fondation	Piles en rivière				10	8k	56k	coeff. de sécurité 7
	Autres appuis (pour une partie, on a ajouté 1/5 de pierres)				14	12	84	
Béton en élévation	Piles hors de la rivière et culées				12	18	126	
	Tympans et piles en rivière				10	20	140	
	Remplissage au-dessus des piles				16			
Béton armé	Petites voûtes	1, 5	2	3 Muschelkalk (15mm à 25mm)	6, 5			
	Cloisons au-dessus des vtes				4			
	Parapets							
Béton	**Gdes voûtes non armées**	**2**	**3, 5**	**2, 5** id. (25mm à 45mm)	**8**	**50**	**250**	coeff. de séc. 5
	Sommiers d'articulation	2 (Sable du Rhin)		2 Porphyre cassé (7mm à 25mm)	4	75 (à leur surface de contact avec les rotules)	375	

Sur 10^{cm}, le béton des parements est à 1 : 3 1/2 — jaunâtre, piqué de points noirs.

On a différencié les diverses parties des tympans par la façon de la surface. Le béton maigre des tympans et des pilastres est grossièrement travaillé à la

2. — Dans le Génie Civil du 5 octobre 1912, M. F. Mencl, Ingénieur en Chef de la Ville de Prague, a rendu compte de la construction (1910-12) du pont en béton de l'île Stvanice sur la Moldau à Prague : il traverse le grand bras par 3 arches en béton, — 36^m — 39^m — 36^m, articulées sur plaques de plomb de 10^{mm}, occupant les 4/15 du joint * entre 2 sommiers de granit, — épaisses à la clef de 0^m75, aux naissances de 0^m90, aux joints de rupture de 1^m05 — biaises à 69° — larges entre têtes de 15^m90 — exécutées en 3 anneaux accolés de 4^m95 — 6^m — 4^m95 de largeur : chaque anneau (6 tranches) a été fait en 4 ou 5 jours. Le béton des voûtes, à 1 de ciment pour 4 de sable et granit cassé, résistait à 28 jours de 505^k à 617^k — Au décintrement (Appareils Zuffer), ** les voûtes de rive ont tassé de 1^{mm} à 4^{mm}, la voûte centrale de 6^{mm} à 10^{mm}.

On a éprouvé les voûtes *** : la grande, sous une charge de 337^T, a fléchi de $1^{mm}5$.

Prix du pont : 350 fr. par mq.

* IV p. 8 à 10, 35 à 48, 89 à 99. ** II p. 166, 192. *** V. p. 179.

grosse pointe : les bandeaux des grandes voûtes, en béton gras, en saillie de 10^{cm} sur les tympans, sont smillés; les pilastres, consoles, parapets, sont à taille fine.

4. Sommiers en béton des rotules. — L'ensemble des sommiers cube 750^{mc}. En les armant à 1 1/2 pour °/₀, on y eût employé 110^T de fer.

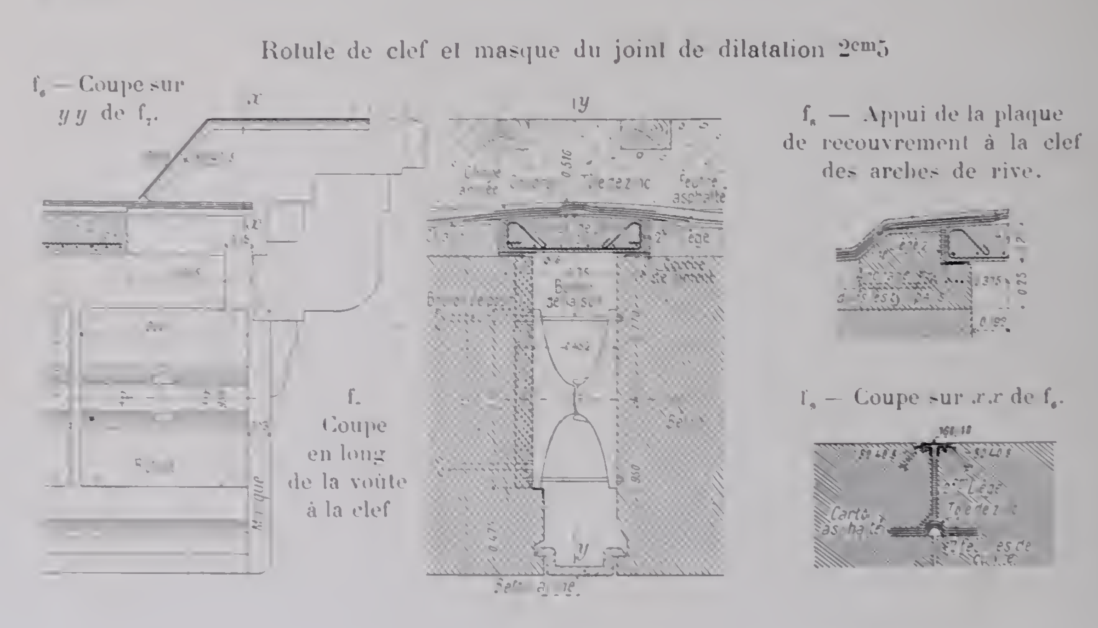
Au laboratoire d'essai des matériaux de Stuttgart, on a essayé, à 28 jours, des échantillons au 1/3, au 1/4, au 1/5 de la dimension des sommiers, armés à 0 °/₀, — 0,33 °/₀, — 0,58 °/₀ — au dosage de 1 volume de ciment, 1 1/2 de sable du Rhin, 2 de porphyre cassé. Le béton a résisté :

	Béton non armé	Béton armé
au 1/3 de la grandeur des sommiers, à	483^k	532^k
au 1/5 id. à	575	633

On n'a pas armé.

5. Joint de dilatation. — Au-dessus des articulations, les tympans sont coupés jusqu'au parapet par un joint de 2^{cm}, garni de plaques de liège. Il se voit sur les bandeaux et la plinthe : sur les tympans, il est masqué par un petit pilastre.

Rotule de clef et masque du joint de dilatation $2^{cm}5$



f_6 — Coupe sur *yy* de f_7.

f_7 — Coupe en long de la voûte à la clef

f_8 — Appui de la plaque de recouvrement à la clef des arches de rive.

f_9 — Coupe sur *xx* de f_8.

Pour empêcher des fissures irrégulières dans le béton par suite du retrait ou du froid, on a coupé par un joint sec les tympans au-dessus des piles : on les a armés en haut.

Les parapets ont, tous les 3^m, un joint à rainure et languette : un sur 2, un sur 3 de ces joints traverse les consoles.

Les rotules sont masquées aux têtes par des plaques de béton armé de 0^m13.

6. Chape. — L'extrados, les faces intérieures des tympans, sont recouverts d'un enduit lissé de mortier de ciment à 1/3 : dessus, sont collées, par du goudron à chaud, des plaques de feutre asphalté de 9^{mm}.

7. Cintres. — On les a calculés pour le poids de la voûte (sans le majorer pour tenir compte du pilonnage), 4580^k par m. q. pour la voûte en rivière.

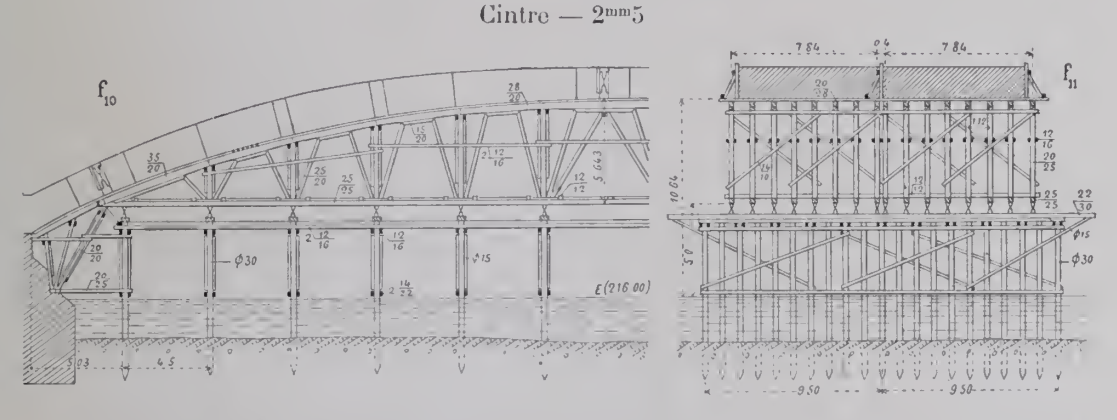
Les efforts permis étaient par $\overline{0^m01}^2$:

	Chêne Hêtre	Pin Sapin
Flexion (tension et compression suivant les fibres)........	75^k	55^k
Compression normale aux fibres [3]	20	15

Pour tenir compte du flambement, l'effort en kg $/\overline{0^m01}^2$ des pièces chargées de bout (montants, pieux) était calculé par la formule :

$$\frac{\beta \text{ (Effort permis à la compression)}}{1 + 0{,}0002 \dfrac{l^2 \text{ (longueur libre)}}{r^2 \text{ (rayon de gyration)}}}$$

Cintre — 2^{mm}5



Aux retombées, jusqu'aux rotules, les cintres ont la largeur des voûtes. Au cerveau, entre les rotules, ils n'en ont que la 1/2 largeur et ont été ripés transversalement. Deux plate-formes en métal étaient disposées sur la tête des pieux, l'une au-dessus de l'autre : pour riper le cintre, on le soulevait avec des vérins, on plaçait, entre les 2 plaques, des rouleaux.

En 2 jours, on souleva, on ripa de 9^m, on abaissa les cintres des 3 grandes voûtes : pour le ripage seul de chaque voûte, il fallait environ 2 heures.

8. Exécution des grandes voûtes. — Elles ont été construites en 2 anneaux : le second sur le cintre du premier ripé transversalement. Le joint longitudinal entre les 2 anneaux s'arrête aux piles.

On bétonna dans l'ordre indiqué au croquis f$_{12}$; on posa les rotules après bétonnage des tranches 3 et 4.

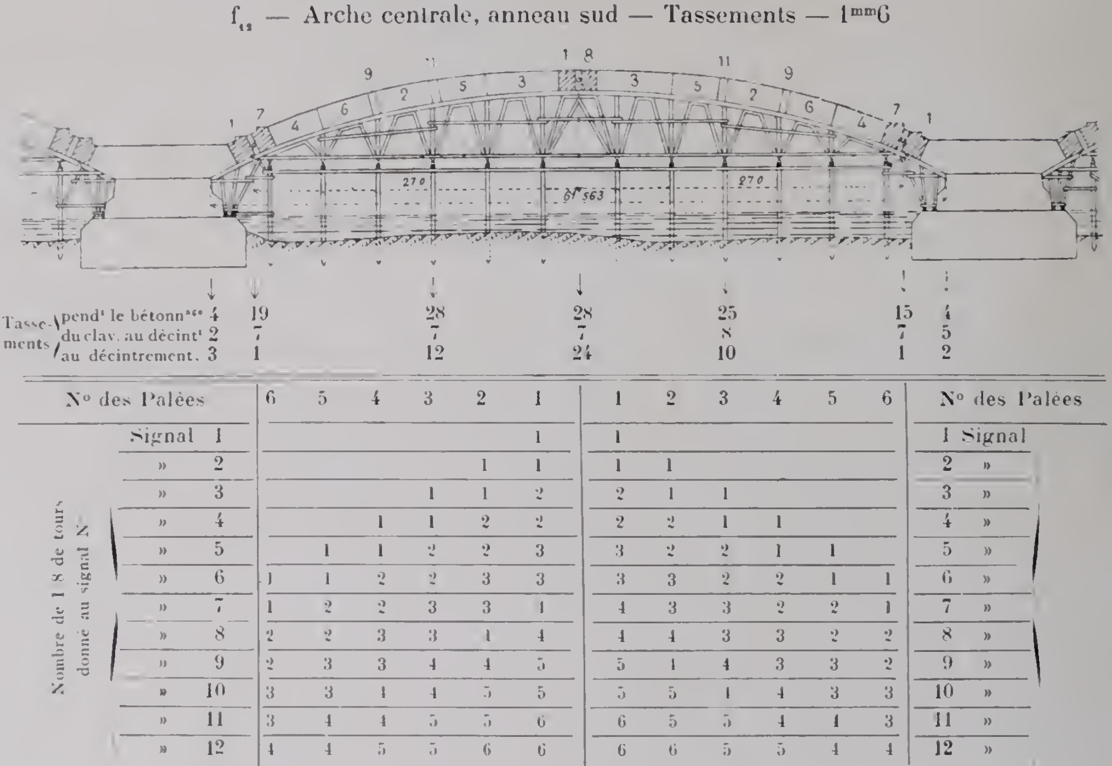
3. — V, p. 132, art. 2

Du 30 avril au 17 juin 1913, on bétonna les retombées des 3 grandes voûtes sur toute la largeur ; le haut des 2 piles, le 1er anneau (en tout 4300mc de béton) et on posa les rotules du 1er anneau (117T) ; du 10 au 30 septembre, on bétonna le 2e anneau (2200mc), on posa ses rotules (117T), opération fort délicate[4].

9. Décintrement.

— On décintra les 3 grandes voûtes à la fois. Sur chaque vérin était disposé un cadran gradué par 1/8 de tour. A chaque signal, on donnait aux vérins le nombre de tours indiqué au tableau ci-après :

f_{12} — Arche centrale, anneau sud — Tassements — 1mmG



Tassements								
pendt le bétonnage	4	19	28	28	25	15	4
du clav. au décintt	2	7	7	7	8	7	5
au décintrement.	3	1	12	24	10	1	2

Nº des Palées		6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	Nº des Palées
Nombre de 1/8 de tours donné au signal N	Signal 1						1	1						1 Signal
	» 2					1	1	1	1					2 »
	» 3				1	1	2	2	1	1				3 »
	» 4			1	1	2	2	2	2	1	1			4 »
	» 5		1	1	2	2	3	3	2	2	1	1		5 »
	» 6	1	1	2	2	3	3	3	3	2	2	1	1	6 »
	» 7	1	2	2	3	3	4	4	3	3	2	2	1	7 »
	» 8	2	2	3	3	4	4	4	4	3	3	2	2	8 »
	» 9	2	3	3	4	4	5	5	4	4	3	3	2	9 »
	» 10	3	3	4	4	5	5	5	5	4	4	3	3	10 »
	» 11	3	4	4	5	5	6	6	5	5	4	4	3	11 »
	» 12	4	4	5	5	6	6	6	6	5	5	4	4	12 »

Sous les 8 palées centrales de la voûte en rivière, la course des vérins était de 16mm, ailleurs de 13mm. On commençait à abaisser les retombées, quand la clef était descendue de son tassement calculé.

Il y avait, pour les 3 cintres, 291 vérins — à chaque vérin, 1 homme — à chaque palée, 2 surveillants pour observer les signaux : en tout, 363 hommes.

Le décintrement fut fait en 1 h. 1/2.

Pendant le décintrement des deuxièmes anneaux, le premier de la voûte en rivière tassa encore de 0mm4. Elle a tassé sensiblement plus que les voûtes de rive : les piles en rivière se sont probablement inclinées vers les rives.

4. — Elle est détaillée S1 p. 211 — On a opéré comme au pont de la Wallstrasse à Ulm IV, p. 149 — Voir aussi IV, p. 134 à 136, pont de Grasdorf.

10. Personnel.

Directeur des Chemins de fer de l'État de Wurtemberg.

Architecture : M. Mayer de Stuttgart, « Baurat ».

Entrepreneurs : MM. Dyckerhoff et Widmann — à la suite d'un concours ouvert entre 6 grandes entreprises[5].

5. — On en trouvera un compte rendu dans le « Beton und Eisen » 1912 cahiers 6, 7, 8.

SOURCE :

S_1. — Schweizerische Bauzeitung, 1914 — 10, 17, 24, 31 Octobre — 7 Novembre.
« Vom Bau der viergeleisigen Eisenbahnbrücke über den Neckar bei Cannstatt » von W. Siegerist, Oberingenieur der Firma Dyckerhoff und Widmann A. G., Zweigniederlassung Dresden.

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME VI

1RE PARTIE — INSTRUCTIONS POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

LIVRE I — OUVRAGES DE 8m D'OUVERTURE ET AU-DESSOUS

TITRE I. — PROJETS D'EXÉCUTION

CHAPITRE I. — DÉBOUCHÉS

TITRE I. — PROJETS D'EXÉCUTION *(Suite)*

TITRE I. — PROJETS D'EXÉCUTION (*Suite*)

CHAPITRE IX. — ABORDS

TITRE II. — DESSINS — TABLEAUX

CHAPITRE I. — OUVRAGES SOUS RAILS EN PLEIN CINTRE

TITRE II. — DESSINS. — TABLEAUX *(Suite)*

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER *(Suite)*

CHAPITRE II. — RECONNAISSANCE DU SOL DE FONDATION A L'EMPLACEMENT DU VIADUC

CHAPITRE III. — PREMIÈRES INDICATIONS GÉNÉRALES POUR FIXER L'OUVERTURE ET LE NOMBRE DES ARCHES ET DESSINER UNE SILHOUETTE APPROCHÉE DE L'ÉLÉVATION

CHAPITRE IV. — COURONNEMENT

CHAPITRE V. — VOÛTES

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER *(Suite)*

CHAPITRE VI. — PILES

CHAPITRE VII. — TYMPANS

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER *(Suite)*

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER *(Suite)*

TITRE II. — DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VIADUCS EN COURBE

CHAPITRE I. — VOÛTES EN BERCEAU. — TRACÉ DES TYMPANS

CHAPITRE II. — VOÛTES NON EN BERCEAU AVEC GÉNÉRATRICES DES NAISSANCES CONVERGEANT AU CENTRE DE LA COURBE DU TRACÉ

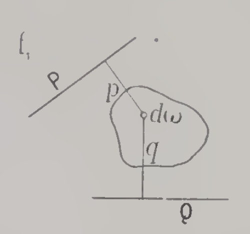
TITRE II. — DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VIADUCS EN COURBE *(Suite)*

LIVRE II. — COMMENT ON CALCULE UNE VOÛTE

ARC ÉLASTIQUE INARTICULÉ SUR APPUIS IMMOBILES

MÉTHODE CULMANN-RITTER

TITRE I. — PRÉAMBULE



MOMENTS DU SECOND DEGRÉ D'UNE SURFACE Ω PAR RAPPORT : A UNE DROITE P ($\Sigma p^2 d\omega$, moment d'inertie) A DEUX DROITES P,Q ($\Sigma pq d\omega$, moment centrifuge, f_1)

CHAPITRE I. — MOMENTS PAR RAPPORT A DEUX AXES PASSANT PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ

CHAPITRE II. — MOMENTS PAR RAPPORT A DES AXES P, Q NE PASSANT PAS PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ

TITRE II. — COMMENT, EN PRINCIPE, ON DÉTERMINE LES RÉACTIONS DES APPUIS DUES A UNE FORCE P MÉTHODE, FORMULES

CHAP. I. — MOUVEMENTS, SOUS L'ACTION D'UNE FORCE P, D'UN POINT J (X, Y) INVARIABLEMENT LIÉ A UNE RETOMBÉE B, SUPPOSÉE LIBRE, D'UN ARC ÉLASTIQUE DONT L'AUTRE RETOMBÉE A DEMEURE IMMOBILE

CHAPITRE II. — COMMENT, DES DÉPLACEMENTS VIRTUELS ϖX, ϖY, $\varpi\theta$ DU CENTRE ÉLASTIQUE DUS A UNE FORCE P, ON DÉDUIT LA RÉACTION DE L'APPUI R^B QUI LES ANNULE

TITRE III. — ARC DISSYMÉTRIQUE COMMENT, EN PRATIQUE, ON CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS

CHAPITRE I. — MOMENTS STATIQUES, MOMENTS D'INERTIE, MOMENTS CENTRIFUGES DES POIDS ÉLASTIQUES. FUNICULAIRES 1 A 5

CHAPITRE II. — COMMENT A L'AIDE DES FUNICULAIRES 1 A 5 ON CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS DUES A DES FORCES VERTICALES

TITRE III. — ARC DISSYMÉTRIQUE *(Suite)*

CHAPITRE III. — CALCUL, A L'AIDE DES LIGNES D'INFLUENCE, DES EFFORTS EN KG $\overline{0^m01}^2$ A L'INTRADOS β_i ET A L'EXTRADOS β_e, D'UNE SECTION QUELCONQUE MM, SOUS L'ACTION D'UNE FORCE 1

CHAPITRE IV. — CALCUL DES EFFORTS PAR $\overline{0^m01}^2$ DUS — NON PLUS A UNE FORCE 1 — MAIS AUX FORCES (POIDS, SURCHARGES) AGISSANT RÉELLEMENT SUR L'ARC

TITRE IV. — ARC SYMÉTRIQUE EFFORTS DANS LA VOÛTE DU PONT ANTOINETTE

CHAPITRE I. — CARACTÉRISTIQUES ÉLASTIQUES DE L'ARC COURBE DES INTERSECTIONS ET COURBE ENVELOPPE DES RÉACTIONS

TITRE IV. — ARC SYMÉTRIQUE *(Suite)*

CHAPITRE II. — TRAVAIL PAR $\overline{0^m01}^2$ SOUS LE POIDS MORT

CHAPITRE III. — EFFORTS PAR $\overline{0^m01}^2$ DUS AUX SURCHARGES ROULANTES

TITRE IV. — ARC SYMÉTRIQUE *(Suite)*

TITRE V. — VÉRIFICATION GROSSIÈRE DES ÉPURES D'UNE VOÛTE

Comparaison avec celles faites pour une voûte dont la fibre moyenne est une parabole ADSB de même portée L et même montée *b*, et pour laquelle le moment d'inertie I d'une section MM inclinée de α sur la verticale

$$= \frac{I_0 \left(\substack{\text{moment} \\ \text{à la clef}}\right)}{\cos \alpha} = I_0 \frac{ds}{dx}$$

TITRE V. — VÉRIFICATION GROSSIÈRE DES ÉPURES D'UNE VOÛTE *(Suite)*

TITRE VI. — LES APPUIS DE L'ARC NE SONT PAS INVARIABLES

3E PARTIE. — TABLES NUMÉRIQUES

DÉBIT DES OUVRAGES ET DES COURS D'EAU

FORMULES DE M. BAZIN

ÉPAISSEUR A LA CLEF

TABLES NUMÉRIQUES *(Suite)*

FRUIT MINIMUM φ A DONNER AU TYMPAN CONVEXE
DES PONTS OU VIADUCS EN COURBE DE RAYON **R**
POUR QU'AUCUN POINT DE L'INTRADOS DU BANDEAU
NE SOIT EN PORTE-A-FAUX
PAR RAPPORT A UN POINT PLUS BAS : MIN $\varphi = \frac{r}{R}$

ANNEXES

PONTS A VOÛTES INARTICULÉES OU ARTICULÉES DE 40^m ET PLUS DE PORTÉE ACHEVÉS APRÈS 1912 TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE C

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE C^1 F^r ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE C *(Suite)*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SÉRIE $C^1 f^r$ ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ELLIPSE E

PONTS EN DEUX ANNEAUX A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $E^n E^n r^{te}$ ($\geqslant 40^m$)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $E^n F^r$ ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC PEU SURBAISSÉ $\widehat{A}$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ f^r ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

PONTS EN DEUX ANNEAUX A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(*Suite*)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES $\geqslant 40^m$ EN BÉTON PEU ARMÉ

VOÛTES ARTICULÉES
ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS $\bar{A}$

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\bar{A}^n$ F^r ($\geqslant 40^m$)

TABLE ABRÉGÉE DES MATIÈRES

TOMES I, II, III, IV, V

TOME I

(TABLE DÉTAILLÉE — TOME I, p. 248)

1re PARTIE — VOÛTES INARTICULÉES

LIVRE I. — DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES INARTICULÉES DE 40m ET PLUS DE PORTÉE. — TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES.

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE C

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE C1 rte (≥ 40m)

Nos d'ordre dans la série C1 rte (≥ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE C1 Fr (≥ 40m)

TOME II

(TABLE DÉTAILLÉE — TOME II, p. 210)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC PEU SURBAISSÉ $\widehat{A}$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

PONTS EN DEUX ANNEAUX
A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SÉRIE Â¹ 1re (≥ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

TOME III

(TABLE DÉTAILLÉE — TOME III, p. 396)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â¹ 1re (≥ 40m)

Nos d'ordre dans la série Â¹ 1re (≥ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ $\overline{A}$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^1$ r^te (≥ 40m)

Nos d'ordre dans la série $\overline{A}^1$ r^te (≥ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE $\overline{A}^1$ aq (≥ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\overline{A}^1$ F^r (≥ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^n$ r^te (≥ 40m)

Nos d'ordre dans la série $\overline{A}^n$ r^te (≥ 40m)

QUELQUES VOÛTES INARTICULÉES
QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉES AU LIVRE I

ANNEXE

ÉPAISSEUR A LA CLEF DES VOÛTES INARTICULÉES

Valeur du coefficient $\alpha = \dfrac{e_0 \text{ (Épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a \text{ (Portée)}}\right] \mu \text{ (Fonction du surbaissement } \sigma)}$

TOME IV

(TABLE DÉTAILLÉE. — TOME IV, p. 287)

2e PARTIE. — VOÛTES ARTICULÉES

LIVRE II. — DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES ARTICULÉES DE 40m ET PLUS DE PORTÉE. — TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES.

Pages Tome IV — Texte | Table détaillée

1°. — VOÛTES SEMI-ARTICULÉES

ARTICULATIONS SUR PLOMB

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A^1 Rte ($\geqslant$ 40m)

ARTICULATIONS A GENOU

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A^1 Rte ($\geqslant$ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE A^1 Fr ($\geqslant$ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE A^n Rte ($\geqslant$ 40m)

2°. — VOÛTES ARTICULÉES *(DE FAÇON PERMANENTE)*

ARTICULATIONS SUR PLOMB

ELLIPSES

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE E^n Fr ($\geqslant$ 40m)

TOME V

(TABLE DÉTAILLÉE. — TOME V, p. 213)

3e PARTIE

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE COMMUN A TOUTES LES VOÛTES

LIVRE II. — COMMENT ON EXÉCUTE UN PONT EN MAÇONNERIE. — FONDATIONS. — CINTRES — VOÛTES

PONTS DÉCRITS DANS L'OUVRAGE

INDEX ALPHABÉTIQUE

(Ceux à voûtes de portée de 40m et plus, en maçonnerie ou en béton non armé, ont un symbole).

Pour le sens des symboles, voir Tomes I, II, III, p. 3 et 4. Le trait horizontal sous la lettre de l'intrados désigne les voûtes articulées : les petites lignes coupant ce trait désignent le type d'articulation (Tome IV, p. 28 et 29).

PONT	Rivière ou voie traversée	*Pays*	Symbole	Tome	Pages Tableau synoptique	Pages Monographie
Frédéric-Auguste, à Plauen	Une place	*Saxe*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{10}	III	14	52
de **Freyssinet**.........	Vézère	*France*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{8}	III	82	112
de **Garching**	Alz	*Bavière*	$\mathbf{E}^{n}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	IV	92	95
de la Coulouvrenière, à **Genève** (*cité plus haut sous la lettre* **C**)....	Rhône	*Suisse*	$\overline{\mathbf{A}}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	IV	78	81
de **Gignac**	Hérault	*France*	$\mathbf{E}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{3}	I	86	103
de **Gloucester**	Severn	*Angleterre*	$\mathbf{E}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{4}	I	86	107
de **Göhren**	Zwickauer-Mulde	*Saxe*	$\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{2}	IV	124	139
du **Gour-Noir**	Vézère	*France*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{6}	III	80	103
de **Grasdorf**..........	Leine	*Hanovre*	$\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	IV	124	129
de **Gräveneck**........	Lahn	*Prusse*, - *Hesse*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	IV	210	213
sur la **Gravona**..........	Gravona	*France*, - *Corse*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ f^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	II	178	183
de **Gross-Kunzendorf**.	Freiwaldauer-Biele	*Allemagne*, - *Silésie*	$\overline{\mathbf{A}}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{6}	III	232	267
de **Grosvenor**, à Chester (*cité plus haut, sous la lettre* **C**)..................	Dee	*Angleterre*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{3}	III	10	29
de **Guggersbach**	Singine	*Suisse*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{11}	III	14	59
sur la **Gutach**	Gutach	*Grand Duché de Bade*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{12}	III	84	122
de **Gulfos**......... ..		*Norvège*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{28}	VI	186	219
de **Hochberg**	Neckar	*Wurtemberg*	$\overline{\mathbf{A}}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{2}	IV	166	177
de **Höfen**	Enz	*Wurtemberg*	$\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	IV	38	41
de l'**Hôtel-Dieu**, à Lyon	Rhône	*France*	$\mathbf{E}^{n}$ $\mathbf{E}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{2}	VI	182	203
de **Huzenbach**........	Murg	*Wurtemberg*	$\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{3}	III	192	206
d'**Illerbeuren**........	Iller	*Bavière*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	IV	156	159
d'**Inzigkofen**........	Danube	*Hohenzollern*	$\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	IV	220	225
d'**Isola del Cantone** (pont en amont et pont en aval)	Scrivia	*Italie*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{3,4}	III	80	98
de **Jamna**	Pruth	*Autriche*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{10}	III	82	118
de **Jaremcze**	Pruth	*Autriche*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{9}	III	82	114
de **Justinien**..........	Sangaris	*Asie-Mineure*	»	III	»	318
de **Kempten**..........	Iller	*Bavière*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{1,2,3}	IV	112	115
Édouard VII, à **Kew** (*classé plus haut. sous la lettre* **E**)....	Tamise	*Angleterre*	$\mathbf{E}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)^{7}	I	144	182
de **Kleinwolmsdorf**	Røder	*Saxe*	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{1}	II	116	125

PONT	Rivière ou voie traversée	*Pays*	Symbole	Tome	Pages — Tableau synoptique	Pages — Monographie
de **Krappitz**	Hotzenplotz	*Allemagne, - Silésie*	$\overline{A}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{5}$	III	232	265
sur le **Krenngraben**.......	Krenngraben	*Autriche*	$\widehat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{17}$	III	86	134
de **Krummenau**.......	Thur	*Suisse*	$\widehat{A}^{1}\ F^{r}\ (> 40^{m})^{25}$	III	90	164
de **Kupferhammer**.....	Freiwaldauer Biele	*Allemagne, - Silésie*	$\overline{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{9}$	III	196	214
de **Langenbrand**.......	Murg	*Grand Duché de Bade*	$\widehat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{21}$	III	88	152
sur le **Latah Creek**, à Spokane	Latah Creek	*Etats-Unis*	»	VI	188	»
de **Lavaur** (Vieux Pont).....................	Agoût	*France*	$E^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{2}$	I	86	97
de **Lavaur**	Agoût	*France*	$\widehat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{4}$	II	118	135
de **Lichtensteig**........	Thur	*Suisse*	$\widehat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{24}$	III	88	161
de **Londres** (London Bridge)..................	Tamise	*Angleterre*	$E^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$	I	138	147
de **Longuich**..........	Moselle	*Prusse-Rhénane*	$\overline{A}^{n}\ r^{te}\ (> 40^{m})^{10}$	III	236	279
de **Lusserat**...........	Charente	*France*	$\widehat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{22}$	III	88	155
Adolphe, à **Luxembourg** *(cité plus haut sous la lettre* **A**)	Pétrusse	*Luxembourg*	$\widehat{A}^{1}\ \widehat{A}^{1}\ r^{te}\ (\leqslant 40^{m})^{1}$	II	60	67
de **Malling**............	Moselle	*Lorraine Allemande*	$\underset{\leftrightarrow}{\overline{A}}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$	IV	166	175
de **Mannheim**.........	Neckar	*Grand Duché de Bade*	$\underset{\leftrightarrow}{\overline{A}}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{9}$	IV	172	206
de **Mantes**............	Seine	*France*	$E^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{3}$	I	140	160
de **Marbach**...........	Murr	*Wurtemberg*	$\underset{\leftrightarrow}{\overline{A}}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{2}$	IV	38	45
de **Marbre**, à Florence *(cité plus haut, sous la lettre* **F**).................	Arno	*Italie*	»	III	»	319
de **Marbre**, à Pise.....		*Italie*	»	III	»	305
de **Maretta**	Scrivia	*Italie*	$\widehat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$	III	80	93
sur le **Martin's Creek**....	Martin's Creek	*Etats-Unis*	»	VI	188	»
du Diable, à **Martorell** *(cité plus haut, sous la lettre* **D**)....	Llobregat	*Espagne*	»	III	»	313
Maximilien, à Munich	Isar	*Bavière*	$\underset{\leftrightarrow}{\overline{A}}^{n}\ r^{te}\ (> 40^{m})^{6}$	IV	168	192
Max-Joseph, à Munich	Isar	*Bavière*	$\underset{\infty}{\overline{A}}^{1}\ r^{te}\ (> 40^{m})^{4}$	IV	222	242
de **Mehring**...........	Moselle	*Prusse-Rhénane*	$\overline{A}^{n}\ r^{te}\ (> 40^{m})^{3}$	III	230	252
de **Michelau**	Glatzer Neisse	*Allemagne, - Silésie*	$\overline{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{6}$	III	194	209
de **Modène**	Panaro	*Italie*	»	III	»	307
de la **Monroe Street**, à Spokane	Spokane	*Etats-Unis*	»	III	284	293
de **Montanges**.........	Valserine	*France*	$\widehat{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{12}$	III	16	62

PONT	Rivière ou voie traversée	*Pays*	Symbole	Tome	Pages — Tableau synoptique	Pages — Monographie
de **Morbegno**..........	Adda	*Italie, - Valteline*	$\bar{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$	IV	62	65
Mosca, à Turin ...	Dora Riparia	*Italie*	$\bar{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$	III	192	199
de **Moulins** (pont de Mansart)................	Allier	*France*	»	III	»	305
de **Moulins-lez-Metz**...	Moselle	*Lorraine allemande*	$\bar{A}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{8}$	IV	170	202
de **Munderkingen**	Danube	*Wurtemberg*	$\bar{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$	IV	52	55
de **Munich** *(cités aussi sous les lettres* **C. M. P. R. W.**) Cornélius.....	Isar	*Bavière*	$\bar{A}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{3}$	IV	166	180
Maximilien...	Isar	*Bavière*	$\bar{A}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{6}$	IV	168	192
Max-Joseph..	Isar	*Bavière*	$\bar{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{4}$	IV	222	242
Prince-Régent	Isar	*Bavière*	$\bar{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{3}$	IV	222	239
Reichenbach .	Isar	*Bavière*	$\bar{A}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{4}$	IV	168	183
Wittelsbach..	Isar	*Bavière*	$\bar{A}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{7}$	IV	170	199
de **Narni**	Néra	*Italie*	»	III	»	317
de **Neckargartach**	Neckar	*Wurtemberg*	$\bar{A}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{5}$	IV	168	186
de **Neckarhausen**......	Neckar	*Hohenzollern*	$\bar{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{2}$	IV	220	232
de **Neuhammer**........	Queis	*Allemagne, - Silésie*	$\bar{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{7}$	III	194	211
Élise, à **Neubourg** *(cité plus haut sous la lettre* **E**)	Danube	*Bavière*	$\bar{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{4}$	IV	126	151
de **Niagara**	Rauma	*Norvège*	$\hat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{12}$	VI	184	207
de **Nogent-sur-Marne**.	Marne	*France*	$C^{n}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$	I	76	79
de **Nydeck**, à Berne *(cité plus haut sous la lettre* **B**).................	Aar	*Suisse*	$\hat{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{6}$	II	12	51
de **Nyons**...........	Eygues	*France*	$\hat{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{2}$	II	10	25
d'**Oloron**	Gave d'Oloron	*France*	$C^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{2}$	I	38	45
d'**Orense**	Miño	*Espagne*	»	III	»	311
d'**Orkla**	Orkla	*Norvège*	$\hat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{26}$	VI	186	218
d'**Orléans**..........	Loire	*France*	$\bar{A}^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{4}$	III	232	255
d'**Ornaisons**	Orbieu	*France*	$C^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$	I	60	63
sur le **Palmgraben**.......	Palmgraben	*Autriche*	$\hat{A}^{1}\ F^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{8}$	II	120	164
de **Pélussin**..........	Ravin de Pélussin	*France*	$\hat{A}^{1}\ f^{r}\ (\geqslant 40^{m})^{6}$	VI	184	209
de Walnut Lane, à **Philadelphie**	Wissahickon Creek	*Etats-Unis*	$\hat{A}^{1}\ \hat{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{2}$	II	62	83
de Marbre, à **Pise** *(cité plus haut, sous la lettre* **M**)....		*Italie*	»	III	»	305
de Bellefield, à **Pittsburg** *(cité plus haut, sous la lettre* **B**)	Creux de Saint-Pierre	*Etats-Unis*	$\hat{A}^{1}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{9}$	III	14	49

ERRATA GÉNÉRAL

On avait d'abord pensé ne faire que 5 Tomes : on a dû en faire 6. Au cours des Tomes I à IV, on a quelquefois renvoyé à un Appendice, Tome V : il est dans le Tome VI.

TOME I

Pages	Au lieu de :	lire :	Pages	Au lieu de :	lire :
26 4e ligne	Ça	Ç'a	171 Dessin f_1 - Numéros des voûtes	1, 2, 3, 4	4, 3, 2, 1
82 Renvoi 1	1908 à 1901	1908 à 1910	175 Dessin f_{10} - Echelle.	10cm	5cm
86 Pt de Vizille, col. 1.	3 centres	5 centres	188 Pt des Amidonniers, col. 9 - Evidemen^ts - Surbaissements.	9m90 1/4,91, 1/4,97	10m10 1/4,07, 1/4,01
90 Pt d'Edmondson, col. 1. Montée...	13m309	13m35	194 3e ligne	la Dalbabe,	la Dalbade,
91 Pt d'Edmondson, col. 15	11 tranches	16 tranches	191 2. Forme des voûtes — Rayons de courbure aux naiss^ces..	: $\rho_1 = \frac{p^2}{R}$	: $\rho_1 = \frac{p^2}{a}$
129 Pt de Signac, col. 16, Décintrement	68 jours	30 jours	245 / 250 Pt de Ballochmyle...	*Angleterre, Ecosse*	*G^de.Bretagne, Ecosse*
112 Pt de Valence, col. 9.	sur murs de 0m95	sur murs de 0m55			
157 10e ligne	avec l'intrados	avec l'extrados			
173 Renvoi 1	$y = \frac{i x^3}{l^2}\left(1 - \frac{x}{l}\right)$	$y = \frac{i x^3}{l^2}\left(1 - \frac{x}{2l}\right)$			

TOME II

Pages	Au lieu de :	lire :	Pages	Au lieu de :	lire :
19 7. Décintrement, dernière ligne....	à 16m35	à 16m53	122 Pt d'Escot, col. 12, Ecart^nt des fermes.	1m50	1m23
68 Dessin f_{47}	$e_1 = 2^m10$	$e_1 = 2^m16$	178 Pt de Ramounails, col. 9, dern^re ligne.	piles de 0m90 3 rouleaux	piles de 0m80 2 rouleaux
120 Pt de Palmgraben, col. 16. Décintr^nt.	29 août	20 juillet	181 Pt de Tuoi, col. 15.	3 rouleaux	2 rouleaux

TOME III

Pages	Au lieu de :	lire :	Pages	Au lieu de :	lire :
16 Pt de Montanges, colonne 1	1908-1909	1908-1910	332 Renvoi 19, 3e ligne..	$(Chx) = \frac{ex + e^{-x}}{2}$	$(Chx) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$
114 3. Chape. 1re ligne..	d'asphalte recouverte	d'asphalte recouvert	334 9e ligne	courbure diminue	courbure augmente
121 1re ligne	Tlinthe	Plinthe	360 Dernière ligne	(sur 3 fois la bande comprimée)	(sur la bande comprimée)
124 Renvoi 5	« Im Einklang.. »	« Im Einklange.. »			
130 Titre, 3e ligne	1902	1901-1902	373 Renvoi 24, 2e ligne..	(..§ 11, art. 2.)	(..§ 2, art. 1).
167 Renvoi 4	$(\geqslant 10^m)^{11}$	$(\geqslant 10^m)^{12}$	371 Renvoi 27, 5e ligne..	(§ 11, art. 2 1))	(§ 2, art. 1),
287 Pt d'Elsen, col. 12, Ecart^nt des fermes.	0m88	1m08	386 Pt de l'Alma, 3e col.	43m38,	43m.
330 4e ligne	y croit	y décroit	387 Pt de Lichtensteig, 11e colonne	1910-1912,	1907-1909,
			390 Pt de Gignac, 3e col.	18m73,	18m42,

TOME IV

Pages	Au lieu de :	lire :	Pages	Au lieu de :	lire :
12 Art. 3, 1re ligne....	Kôpcke (f_{11})	Kôpcke[18, 19] (f_{11})	223 Pt Max-Joseph, col. 12 — Nombre de fermes	9	10
15 Tableau 11$_4$ - Valeurs de $\frac{2x}{l}$	0,016, 0,011, 0,019, 0,10, 0,12, 0,12, 0,29, 0,29, 0,30	0,070, 0,062, 0,073 0,152, 0,183, 0,179, 0,39, 0,43, 0,45	260 Tableau — Avant-dernière col.	Epaiss^r en 0m01	Epaiss^r en 0m001
21 Renvoi 18, 5e ligne..	triangles 00'' C	triangles 00''0'	267 Pt de Grasdorf, 1re colonne	1', 2'5, 4'5	1', 2'5, 4'
46 6. Exécution de la voûte, 6e ligne...	tassa de 55mm,	tassa de 72mm,	272 Renvoi 1	p. 45.	p. 55.
113 Titre, 1re ligne	(*Bavière*)	(*Wurtemberg*)			
156, 159, 217 / 261, 284, 295 Pont d'Illerbeuren	classé comme très surbaissé $\bar{A}$	est assez surbaissé $\widehat{A}$	276 Renvoi 6 - Pt de Moulins-lez-Metz, 3e colonne	Bandeaux en PT	Bandeaux en MEV
168 Pt de Neckargartach, col. 3	Fruit : 1/10	Fruit : 1/40	285 Pt Cornélius, 1e col..	$(\geqslant 40^m)^2$	$(\geqslant 40^m)^3$
			285 Pt de Neckarhausen, 2e colonne	Danube	Neckar
221 Pt d'Inzigkofen, col. 10. Rive dr^te. Pression	28k6	7k7	291 Pt Elise, 1re ligne...	$(\leqslant 40^m)^4$	$(\geqslant 40^m)^4$

TOME V

Pages		Au lieu de :	Lire :
27	Renvoi 39..........	Art. 7. — A.	Art. 8.
34	Photographie.......	Φ_5 - amont	Φ_5 - aval
34	id.	Φ_6 - aval	Φ_6 - amont
38	Renvoi 11. 5ᵉ ligne..	10 jours	100 jours
52	Pᵗ de Lichtensteig. 4ᵉ colonne.......	Allemagne	Suisse
52	Pᵗ de Krummenau. 4ᵉ colonne.......	Allemagne	Suisse
61	Pᵗ d'Edmondson. 4ᵉ colonne.......	I - 206	I - 122
70	Croquis des 2ᵉ, 3ᵉ, 1ᵉ colonne..........	l_a, l_v, l_a à l'extrados	l_a, l_v, l_a à l'intrados
75	Renvoi 10. 1ʳᵉ ligne.	(renvoi 4),	(renvoi 5),
77	Renvoi 17. Valeurs de r_2 et r_1.......	$E = r_2 + r_1$ $\frac{E}{2}(1 \pm \text{cotg}\,\theta)$	$CF = r_2 + r_1$ $\frac{E}{2}(\sin\theta \pm \cos\theta)$
83	Renvoi 12..........	soit 0,097	soit 0,0097
102	Dessin f_1...........	le redresser	
103	Photographie........	Pont Ælius	Pont Ælius
141	Renvoi 42..........	Nydeck (II, 33);	Nydeck (II, 53);
153	Renvoi 101.........	Teinach (IV, 204);	Teinach (III, 204);
154	Renvoi 122. Pᵗ de Krenngraben.....	(III, 87, 136);	(II, 87, 136);
160	Renvoi 10. Pᵗ de Céret	(I - 118),	(I - 18),
163	Renvoi 41. Pᵗ du Prince-Régent...	(IV, 233).	(IV, 223).
163	Renvoi 41. Pᵗ de Jaremcze..........	(III, 110).	(III, 116).
175	Art. 3. Pont de Trittenheim. Tassemᵗ.	20ᵐᵐ	12 à 15ᵐᵐ
203	Tableau II. Plus grandes voûtes inarticulées. 4ᵉ col.	48ᵐ70 (Vérone)	55ᵐ (Annibal, Diable)
210	Art. 3. Pᵗ d'Edmondson. Surbaissemᵗ.	1/5,428	1/3,17

TOME VI

13	§ 1. — Art. 2.......	même 0ᵐ50.	même 0ᵐ20.
48	Renvoi 27..........	Table T_1,	Table T_2,
64	Renvoi 69. 11ᵉ ligne.	côté Amiens	côté Rouen.
71	Renvoi 92..........	V, p. 50.	V, p. 60.
83	Art. 1. — 4ᵉ ligne..	sur 0ᵐ25	sur 0ᵐ20
159	Art. 1. — Fin de la 2ᵉ ligne..........	axe $\mathcal{G}X$.	axe $\mathcal{G}Y$.
166	§ 2. Art. 1 - 2ᵉ lig...	$Z_1^B = \frac{v^2}{4a^2}$,	$Z_1^B = \frac{v^2}{4a}$,
199	Pᵗ sur la Roizonne..	1912-1916	1912-1915
218	Pᵗ sur l'Orkla......	1912-1915	1911-1915
214	Renvoi 11 - 1ʳᵉ ligne..	d'octobre 1881,	d'octobre 1886,

POUR RELIER, CONSULTER, CONSERVER L'OUVRAGE, voir p. 283

POUR RELIER, CONSULTER, CONSERVER L'OUVRAGE

A CAUSE DES NOMBREUSES PHOTOGRAPHIES QUI Y FIGURENT, ON A DÛ, MALGRÉ QU'ON EN EÛT, EMPLOYER DU PAPIER « COUCHÉ », QUI EST FRAGILE ET DEMANDE QUELQUE SOIN POUR ÊTRE MANIÉ ET CONSERVÉ.

POUR RELIER, ON COUDRA LES CAHIERS SUR UNE BANDE DE TOILE : ON BROCHERA, PUIS ON COLLERA SUR LES COUTURES UNE SECONDE BANDE DE TOILE, OU MIEUX, DE PEAU.

ON RELIERA AVEC DE TRÈS FORTS « PLATS ».

POUR OUVRIR UN VOLUME RELIÉ, ON SE GARDERA DE LE POSER D'ABORD SUR UN PLAT : ON LE PLACERA VERTICALEMENT SUR SON DOS.

NE PAS PLIER LE PAPIER, ON LE CASSE — NI FEUILLETER AVEC UN DOIGT MOUILLÉ, ON LE TACHE.

CONSERVER LES VOLUMES EN UN LIEU SEC, A L'ABRI DU SOLEIL ET DE LA CHALEUR.